



UNIVERSIDADE ESTADUAL DE CAMPINAS

INSTITUTO DE GEOCIÊNCIAS

PÓS-GRADUAÇÃO EM GEOCIÊNCIAS
ÁREA DE ADMINISTRAÇÃO E POLÍTICA DE
RECURSOS MINERAIS

RICARDO FURTADO

USO DA ANÁLISE DE SENSIBILIDADE EM MODELOS DE DECISÃO
MULTIATRIBUTOS PARA SISTEMAS DE EXPLORAÇÃO E PRODUÇÃO DE
PETRÓLEO

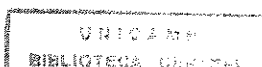
Dissertação apresentada ao Instituto de Geociências como
parte dos requisitos para obtenção do título de Mestre em
Administração de Política de Recursos Minerais

Orientador: Professor Doutor Saul Barisnik Suslick

Este exemplar corresponde
redação final, aprovada
por Ricardo Furtado
e aprovada em 25/02/2000
Saul Suslick
ORIENTADOR

CAMPINAS - SÃO PAULO

FEVEREIRO 2000



9129-00

UNIDADE	B. C.
N.º CHAMADA:	T/UNICAMP
	F984u
V.	Ex.
TOMOS DE	90993
	248100
	D <input checked="" type="checkbox"/>
PREÇO	R\$11,00
DATA	25/04/00
N.º CPD	

CM-00142029-1

FICHA CATALOGRÁFICA ELABORADA
PELA BIBLIOTECA I.G. – UNICAMP

Furtado, Ricardo
F984u Uso da análise de sensibilidade em modelos de decisão
multiatributos para sistemas de exploração e produção de
petróleo / Ricardo Furtado.- Campinas, SP.: [s.n.], 2000.

Orientador: Saul Barisnik Suslick.
Dissertação (mestrado) Universidade Estadual de Campinas,
Instituto de Geociências.

1. Petróleo Exploração. 2. Processo decisório por múltiplo
critério. 3. Análise de Risco. 4. Engenharia Econômica I.
Suslick, Saul Barisnik II. Universidade Estadual de Campinas,
Instituto de Geociências. III. Título.



UNIVERSIDADE ESTADUAL DE CAMPINAS

INSTITUTO DE GEOCIÊNCIAS

PÓS-GRADUAÇÃO EM GEOCIÊNCIAS
ÁREA DE ADMINISTRAÇÃO E POLÍTICA DE
RECURSOS MINERAIS

AUTOR: RICARDO FURTADO

TÍTULO DA DISSERTAÇÃO: USO DA ANÁLISE DE SENSIBILIDADE EM MODELOS
DE DECISÃO MULTIATRIBUTOS PARA SISTEMAS DE EXPLORAÇÃO E
PRODUÇÃO DE PETRÓLEO

ORIENTADOR: Prof. Dr. SAUL BARISNIK SUSLICK

Aprovada em: 25 / 02 / 2000

PRESIDENTE: Prof. Dr. SAUL B. SUSLICK

EXAMINADORES:

Prof. Dr. Saul Barisnik Suslick

- Presidente

Prof. Dr. Celso Kazuyuki Morooka

Dr. Francisco Nepomuceno Filho

Campinas, 25 de fevereiro de 2000

DEDICATÓRIA

Dedico este trabalho as pessoas que fazem da ciência um meio para a construção de uma sociedade mais justa.

AGRADECIMENTOS

Primeiramente, queria agradecer aos meus pais, José Carlos e Nádia, pelo apoio e compreensão em todos os momentos da minha história, fornecendo toda segurança e carinho necessários para a conquista dos meus objetivos. Aos meus irmãos Glauber e Veridiana, que juntos aos meus pais, formam o alicerce resistente na concretização dos meus sonhos.

À Deborah Moritz que firmemente suportou a minha ausência sem nunca questionar meus compromissos junto a universidade, dando-me amor, carinho e atenção nos momentos que estivemos juntos.

Ao meu orientador Professor Dr. Saul B. Suslick, pela força e confiança que depositou na minha capacidade desde da época da graduação até cada item desta dissertação, sempre sendo franco, honesto, amigo e muito compreensível. São homens como ele que fazem a gente acreditar que existe a possibilidade de um mundo melhor.

À todos os professores e funcionários do Instituto de Geociências da UNICAMP, especialmente do DARM, com quem mantive um contato maior, que nunca negaram ajuda nestes dois anos de convivência, sempre me atendendo de forma educada e competente.

Ao Professor Dr. John C. Butler da *The University of Texas at Austin* no pronto atendimento de dúvidas sobre a metodologia.

Aos colegas de pós-graduação do IG, pela alegria e harmonia na convivência com todos. Ao colega Luis Henrique Zapparolli pela amizade construída neste último ano, nunca negando ajuda nos aspectos técnicos deste trabalho, além do apoio a nível pessoal. Aos companheiros Guica, Roberto e Rogério (DEP/FEM/UNICAMP), que modificaram muitos conceitos que tinha preestabelecido na minha mente.

Ao CNPq e ao PADCT/CNPq pelo apoio financeiro para a realização desta pesquisa.

Finalmente agradeço a todas as pessoas que de alguma forma vivenciaram, apoiaram e acreditaram no meu trabalho, alguns estiveram presentes em algum trecho do percurso enquanto outros estiveram no caminho inteiro, torcendo, ajudando e dando opiniões construtivas sobre o trabalho.

*If we begin with certainties, we shall end in doubts;
but if we begin with doubts, and are patient in them,
we shall end in certainties.*

Francis Bacon

SUMÁRIO

Introdução	01
Capítulo 1 - Risco e incerteza na tomada de decisão na indústria do petróleo	07
1.1 Elementos da teoria de decisão	08
1.1.1 Árvore de decisão	14
1.1.2 Risco e incerteza: principais diferenças	17
1.1.3 Comportamento frente ao risco	20
1.2 As incertezas no processo de exploração e produção de petróleo	21
1.3 Teoria de utilidade	23
1.3.1 Axiomas da teoria de utilidade	24
1.3.2 Definição da teoria de utilidade	26
1.3.2.1 Utilidade esperada	27
1.3.2.1 Alguns cuidados	27
Capítulo 2 – Modelo de decisão baseado na função utilidade	29
2.1 Modelo de decisão unidimensional	29
2.2 Comparação entre os principais métodos de decisão (MAUT, AHP e MCDA)	33
2.3 Modelo de decisão com múltiplos atributos	35
2.3.1 Conceitos importantes para a formulação do MAUT	36
2.3.1.1 Independência preferencial	37
2.3.1.2 Independência de utilidades	38
2.3.1.3 Usando a independência	39
2.3.1.4 Atributos substitutos e complementares	40
2.3.1.5 O problema do banco de sangue	41
2.3.2 Método de associação dos atributos	42
2.4 Estimativa dos pesos dos atributos e análise de sensibilidade	43
Capítulo 3 - Métodos de análise de sensibilidade	46
3.1 Análise de sensibilidade unidimensional	49
3.2 Análise de sensibilidade bidimensional	50
3.3 Análise de sensibilidade de dimensão elevada	53
3.3.1 Pesos Aleatórios	54
3.3.2 Pesos Ordenados	55
3.3.3 Pesos com Distribuição	56
3.3.4 Processo de simulação	56

Capítulo 4 - Aplicação da análise de sensibilidade de dimensão elevada nas atividades de E&P na indústria do petróleo	59
4.1 - Estudo de Caso 1 - Aplicação da análise de sensibilidade de dimensão elevada na escolha do melhor prospecto de exploração de petróleo offshore.	59
4.2 - Estudo de Caso 2 - Escolha do melhor sistema de produção de petróleo offshore.	69
Considerações Finais	81
Referências Bibliográficas	84

LISTA DE FIGURAS

1.1 Representação esquemática dos passos da análise de decisão	10
1.2 Bases da análise de decisão	12
1.3 Árvore de decisão de perfurar ou não um poço (valores esperados de produção em milhões de m ³ de óleo (MMm ³))	15
1.4 Árvore de decisão completa de perfurar ou não um poço	17
1.5 Definição de equivalente certo e prêmio de risco	21
1.6 Função utilidade frente ao risco	24
1.7 Determinação empírica da função utilidade	26
2.1 Estimando a tolerância ao risco	31
2.2 Superfície de utilidade para dois atributos	37
3.1 Análise de sensibilidade unidimensional dos pesos do modelo de decisão	51
3.2 Análise de sensibilidade bidimensional dos pesos do modelo de decisão	52
3.3 Fluxograma das etapas utilizadas na simulação dos pesos na análise de sensibilidade de dimensão elevada	55
4.1 Curva de utilidade do atributo financeiro (exploração)	61
4.2 Alternativas de prospecto de exploração de maior preferência entre todas as combinações de pesos	65
4.3 Perfil hierárquico: forma aditiva (exploração)	67
4.4 Perfil hierárquico: forma multiplicativa (exploração)	68
4.5 Curva de utilidade para o atributo financeiro (produção)	71
4.6 Evolução do número acumulado de plataformas ano a ano	72
4.7 Curva de utilidade do atributo risco tecnológico	73

4.8 Alternativas com maior preferência entre todas as combinações de pesos	76
4.9 Perfil hierárquico: forma aditiva (produção)	78
4.10 Perfil hierárquico: forma multiplicativa (produção)	80

LISTA DE TABELAS

1.1	Resumo de dados da decisão de perfurar ou não um poço de petróleo	16
3.1	Valores de utilidade para a escolha da sede da empresa	48
3.2	Modelo de utilidade aditivo	49
4.1	Resumo da avaliação econômica dos prospectos de exploração de petróleo	60
4.2	Resumo das características do reservatório dos prospectos de exploração de petróleo	62
4.3	Pesos dos atributos para o modelo de exploração de petróleo	64
4.4	Utilidades de cada atributo e utilidade final	64
4.5	Frequência relativa da classificação das opções pelo modelo aditivo (exploração)	66
4.6	Frequência relativa da classificação das opções pelo modelo multiplicativo (exploração)	68
4.7	Resumo da avaliação econômica das alternativas para a produção de petróleo	70
4.8	Quantidade de plataformas instaladas e produzindo	73
4.9	Pesos dos atributos para a escolha do sistema de produção	75
4.10	Utilidade de cada opção de plataforma de petróleo	75
4.11	Frequência relativa da classificação das opções pelo modelo aditivo (Produção)	77
4.12	Frequência relativa da classificação das opções pelo modelo multiplicativo (Produção)	79

LISTA DE SIGLAS, ABREVIATURAS E SÍMBOLOS

AHP	- Processo Hierárquico Analítico
bb1	- barris
c	- Coeficiente de aversão ao risco
E & P	- Exploração e Produção
FPSO	- <i>Floating, Production, Storage and Offloading</i>
FSO	- <i>Floating, Storage and Offloading</i>
MAUT	- Teoria de Utilidade Multiatributos
MCDA	- Auxílio de Decisões com Múltiplos Critérios
MM	- Milhões
SS	- <i>Semi Submersible</i>
TLP	- <i>Tension Leg Platform</i>
TIR	- Taxa Interna de Retorno
VME	- Valor Monetário Esperado
VPL	- Valor Presente Líquido



UNIVERSIDADE ESTADUAL DE CAMPINAS

INSTITUTO DE GEOCIÊNCIAS

PÓS-GRADUAÇÃO EM GEOCIÊNCIAS
ÁREA DE ADMINISTRAÇÃO E POLÍTICA DE
RECURSOS MINERAIS

**USO DA ANÁLISE DE SENSIBILIDADE EM MODELOS DE DECISÃO
MULTIATRIBUTOS PARA SISTEMAS DE EXPLORAÇÃO E PRODUÇÃO DE
PETRÓLEO**

RESUMO

DISSERTAÇÃO DE MESTRADO

Ricardo Furtado

As empresas do setor petrolífero enfrentam na atualidade um clima de competição acirrada em decorrência da volatilidade dos preços do óleo, das margens estreitas de rentabilidade e das restrições ambientais. Neste cenário as firmas devem dispor de ferramentas adequadas para balancear as relações entre custo e benefício dos fatores econômicos, ambientais, tecnológicos e de mercado, que são elementos chaves no processo decisório de investimentos. Este trabalho tem como principal objetivo analisar o comportamento dos pesos (importância relativa) dos atributos no modelo de decisão multicritérios através da análise de sensibilidade de dimensão elevada. A vantagem desse método é proporcionar ao analista uma melhor caracterização e controle na atribuição dos pesos dos atributos, fornecendo um cenário transparente da decisão. A aplicação desta metodologia foi analisada em dois estudos de caso na área de exploração e produção de petróleo. O primeiro voltado para a seleção de um prospecto exploratório entre três opções, onde interagem os objetivos da empresa, considerando os atributos financeiro, tecnológico e de mercado. E o segundo estudo trata de uma simulação para um projeto hipotético de produção utilizando-se como opções FPSO (*Floating Production Storage and Offloading*), TLP (*Tension Leg Platform*) e SS (*Semi Submersible*) e os atributos financeiro, tecnológico e ambiental para cada um dos sistemas de produção. Neste segundo caso, o modelo possibilita simular as diversas opções, proporcionando ao gerente a escolha do sistema de produção mais adequado aos seus objetivos e preferências.



UNIVERSIDADE ESTADUAL DE CAMPINAS

INSTITUTO DE GEOCIÊNCIAS

PÓS-GRADUAÇÃO EM GEOCIÊNCIAS
ÁREA DE ADMINISTRAÇÃO E POLÍTICA DE
RECURSOS MINERAIS

**USE OF THE SENSITIVITY ANALYSIS FOR MULTI-ATTRIBUTES DECISION
MODELS FOR OIL EXPLORATION AND PRODUCTION SYSTEMS**

ABSTRACT

DISSERTAÇÃO DE MESTRADO

Ricardo Furtado

Today, oil companies must be able to survive in a hostile and competitive environment. Such environment involves volatility of oil prices, the narrow margins of profitability, and ever increasing environmental restrictions. In order to survive, firms must have the appropriate tools to consider the tradeoffs involving the financial, environmental, technological and of market parameters which are the key elements within the investment decision-making process. The aim of the present work is to analyze the behavior of the weights (relative importance) of the attributes in the multi-criteria decision model through a high dimension sensitivity analysis. Among the benefits of such method are: provide the analyst (decision-maker) with a better characterization and control of the weights of the attributes, providing the user with a clear view of the entire decision process. The methodology suggested in this dissertation was applied in two oil exploration and production case studies. The first case involved the selection of an exploratory target among three options. In this case, there is interaction of the objectives of the company, where financial, technological and of market parameters interact. In the second case, a hypothetical production project is suggested. For this second study, the decision-maker has the option of using one of the following production systems: (1) a FPSO (Floating, Production, Storage and Offloading); (2) a TLP (Tension Leg Platform); or (3) a SS (Semi Submersible). The attributes for each one of the production systems are financial, technological and environmental. In this second case, the model makes it possible to simulate several options, providing the manager with the choice of the most appropriate production system to his objectives and preferences.

INTRODUÇÃO

No contexto atual as decisões em um âmbito geral são tomadas em ambientes de incerteza e risco. Certamente problemas distintos podem envolver dificuldades diferentes e geralmente especiais. Embora toda decisão tem sua característica particular, existem quatro fontes básicas de dificuldade (CLEMEN, 1990). A teoria da análise de decisão ajuda o tomador de decisão no reconhecimento e na análise destas dificuldades.

Primeiro, uma decisão pode ser complicada devido a sua complexidade. A análise de decisão proporciona um método efetivo para organizar um problema complexo em uma estrutura que então pode ser facilmente visualizada e analisada. Segundo, um fator complicante deriva da existência de incertezas na situação. O modelo de decisão pode ajudar na identificação das principais fontes de incertezas e na representação quantitativa destas. A terceira fonte de dificuldade provém do fato que os tomadores de decisão estão interessados em operar com múltiplos objetivos, mas progressos em uma direção pode impedir o progresso de outras. Uma ferramenta para modelar de forma coerente critérios conflitantes é proporcionada pela análise de decisão. A quarta e última dificuldade é que uma decisão pode ser dificultada se diferentes perspectivas apontam para diferentes conclusões. O uso da análise de decisão proporciona ferramentas para auxiliar o tomador de decisão na solução desta dificuldade.

De uma maneira geral no processo decisório, o investidor se defronta com dois objetivos: maximizar o retorno esperado e minimizar o risco. A intuição do analista é importante, mas insuficiente, pois não possibilita uma revisão e uma análise da qualidade das decisões passadas quando os objetivos acima mencionados estão envolvidos de forma nem sempre harmônica.

É necessário ressaltar que as técnicas de análise de decisão não visam eliminar nem reduzir o risco inerente às atividades de exploração e produção de petróleo. Trata-se de uma ferramenta para auxiliar o tomador de decisão na quantificação e no entendimento dos riscos, para que a empresa possa de forma racional avaliar a o seu nível de exposição aos mesmos.

O método de análise de decisão com múltiplos objetivos (MAUT) proporciona um significado lógico e tratável quando estão envolvidos no processo decisório objetivos contraditórios. O MAUT é formulado de acordo com as preferências em relação ao risco do gerente ou de um grupo de pessoas que definem quanto, como e onde será investido o capital da empresa. Uma das maiores dificuldades para formulação do MAUT é a atribuição de pesos aos atributos, principalmente quando o número de atributos é maior que dois. Na maioria dos casos as empresas já possuem um prévio conhecimento da importância de cada variável, mas não conseguem, com exatidão, definir estes pesos. Em outros casos os tomadores de decisão não tem noção da hierarquização dos atributos, tornando ainda mais complexo a definição de um modelo que represente adequadamente o comportamento e a capacidade da empresa em relação ao risco.

Objetivo

O objetivo deste trabalho é desenvolver uma metodologia de análise de decisão com múltiplos critérios, enfatizando a hierarquização dos atributos de decisão dentro de relativa ordem de importância, utilizando como estudos de caso projetos de exploração e produção de petróleo *offshore*.

Devido aos grandes investimentos necessários para a execução de um projeto de desenvolvimento e produção de uma área no setor petrolífero, as decisões de participação em um projeto estão deixando de ser intuitivas. Segundo NEPOMUCENO, (1997) “Um dos principais objetivos da análise de decisão é desencorajar a tomada de decisão intuitiva, quando importantes decisões tem que ser tomadas”.

O investidor tem dois objetivos: maximizar o retorno esperado e minimizar o risco. A única forma de alcançar estes objetivos é através de uma análise racional, deixando de lado a intuição, aplicando as técnicas previamente desenvolvidas.

Atualmente, não só no setor petrolífero, mas em qualquer área de atuação onde exige-se tomadas de decisão que envolvem riscos, os responsáveis por estas medidas decisórias deixaram de basear-se na própria experiência, utilizando técnicas de avaliação econômica e

quantificando e analisando a sensibilidade dos resultados finais. Estes executivos desenvolvem modelos que os auxiliam nas tomadas de decisão no que diz respeito a alocação de capital e participação em algum projeto ou investimento necessário para o progresso econômico de sua atividade.

Dentro dessa perspectiva, o principal objetivo deste trabalho é introduzir uma metodologia que permita avaliar os pesos dos atributos no modelo de decisão com múltiplos critérios através da análise de sensibilidade de dimensão elevada. Segundo BUTLER *et al.* (1996), uma das vantagens da análise de sensibilidade de dimensão elevada em relação aos métodos tradicionais é a possibilidade de hierarquizar os pesos, bem como a inclusão de um teste de robustez. A análise de sensibilidade tradicional somente é funcional quando aplicada em até duas variáveis. Na atualidade, as empresas do setor de exploração e produção de petróleo almejam mais que dois objetivos, como por exemplo: elevado retorno financeiro, baixo impacto ambiental, alto ganho tecnológico e segurança nas suas operações. O uso da análise de sensibilidade unidimensional não fornece uma avaliação mais extensiva do modelo de decisão, pois elimina uma análise simultânea e interativa dos pesos. Por sua vez, a análise de sensibilidade de dimensão elevada avalia o modelo de decisão com “n” atributos, com n maior que um. Esta abordagem foi aplicada por BUTLER *et al.* (op.cit) em um modelo para escolha do melhor lugar para a instalação de uma usina termelétrica envolvendo treze opções locacionais.

Metodologia

A metodologia que será empregada no nosso estudo parte do pressuposto que alguns conceitos da análise e decisão já foram amplamente explorados em outros estudos e que aqui serão somente revistos.

O processo metodológico é baseado na teoria de decisão com múltiplos critérios utilizando a teoria de utilidade (MAUT). O MAUT é um processo de decisão que captura e considera as preferências do decisor em relação ao risco. Neste sentido, o objetivo da

empresa passa a ser a maximização da utilidade esperada (uma medida que incorpora o risco) e não mais a maximização do valor monetário esperado.

O primeiro passo para formulação do MAUT é caracterização dos objetivos em função de atributos e a obtenção das utilidades de cada um dos atributos em relação as opções existentes. Definidas as funções utilidades, o decisor define a importância relativa de cada objetivo e calcula a utilidade de cada opção através de um modelo aditivo ou multiplicativo.

Uma das grandes dificuldades do método é a exata hierarquização dos objetivos, pois a existência de múltiplos critérios faz com que a ordenação dos atributos seja uma tarefa complexa, complicada e passível de erros. Para minimizar este problema, é empregada a análise de sensibilidade nos pesos dos atributos. Os processos convencionais não conseguem captar as interações entre os pesos, pois só variam um peso de cada vez, mantendo os outros constantes. Uma forma de avaliar a interação entre os pesos foi aplicado por BUTLER *et al.* (1997), sendo denominada análise de sensibilidade de dimensão elevada. Com esta análise de sensibilidade, o decisor tem condição de verificar o comportamento do modelo quando os pesos são variados ao mesmo tempo e decidir se deve reformular o problema ou se a estimativa está de acordo com as preferências da empresa.

Justificativa

Os pesquisadores que estudam e trabalham com o processo decisório, aplicam a técnica utilizando um ou dois atributos, tomando suas decisões baseadas nestes critérios. Devido a dificuldade de compreensão da metodologia e até mesmo do formalismo matemático, pouco foi desenvolvido e aplicado em relação a três ou mais critérios.

A metodologia de análise de sensibilidade de dimensão elevada é um processo baseado no simulador de Monte Carlo, permitindo que os pesos dos atributos sejam simulados várias vezes, o que possibilita avaliar o comportamento do modelo estatisticamente.

Este tipo de metodologia proporciona um modelo que ajudará a empresa exploradora e produtora de petróleo a definir sua estratégia de atuação econômica, através de um método sistemático e compreensivo de tomada de decisão. Desta forma este tipo de trabalho, com a situação econômica mundial e concorrência acirrada do mercado produtor de óleo, é de total relevância no meio acadêmico e profissional.

Diariamente tomamos decisões em nossas vidas, e isto também é verdade no que diz respeito ao cotidiano das empresas, e como algumas decisões, principalmente no setor petrolífero, envolvem milhões de dólares, a técnica proposta será bem aproveitada, pois é totalmente aplicável.

É necessário ressaltar que esta técnica não elimina nem reduz o risco. A sua utilidade é ser uma ferramenta que auxilie o tomador de decisão em relação a avaliação, quantificação, e entendimento dos riscos, para que o gerente possa decidir de forma com que minimize a exposição da empresa ao risco.

Estudos de Caso

A análise de sensibilidade com dimensão elevada foi aplicada em um caso de exploração e outro da produção de petróleo *offshore*. No primeiro caso, o decisor tem que escolher qual o melhor prospecto para investir seu capital, dentro de três opções. Este cenário foi primeiramente desenvolvido por NEPOMUCENO *et al.* (1999) utilizando dois atributos: risco financeiro e tecnológico. Os atributos foram considerados mutuamente independentes, permitindo assim a utilização do modelo de utilidade aditivo. Para a aplicação da análise de sensibilidade com dimensão elevada, uma terceira variável é incorporada no modelo: risco de mercado; passando assim a decisão ser baseada em três atributos (FURTADO & SUSLICK, 2000). Quanto mais atributos são incorporados, mais complexa torna-se a decisão, obrigando a aplicação de métodos mais sistemáticos para a estimação do modelo e avaliação dos resultados. Com a análise de sensibilidade com dimensão elevada, o tomador de decisão pode definir qual atributo tem mais importância

para a empresa e qual importância relativa de cada um, além de verificar a coerência das preferências do decisor com o modelo obtido.

Uma aplicação da análise de decisão com múltiplos objetivos na área de produção de petróleo *offshore* foi feita por CASTRO & FURTADO (1998) e reformulado por CASTRO *et al.* (2000) utilizando três atributos: risco financeiro, tecnológico e ambiental. A decisão consiste em escolher qual plataforma marítima opera de forma mais eficiente em uma bacia predeterminada e por qual meio (oleoduto ou navio) será transportado o óleo. Neste trabalho, os pesos foram definidos de acordo com levantamentos bibliográficos e através de pesquisas junto aos gerentes responsáveis pelas decisões. Os atributos foram considerados mutuamente independentes, permitindo assim a aplicação do modelo de utilidade aditivo. A análise de sensibilidade com dimensão elevada permite verificar a interação entre os pesos e a qualidade da estimação, além de testar a robustez do modelo. FURTADO & SUSLICK (1999) aplicam esta metodologia neste cenário de produção. O método é aplicado nos dois modelos de utilidade (aditivo e multiplicativo) para tomadas de decisão. Através da análise de sensibilidade de dimensão elevada é possível fazer um comparativo entre os dois modelos de utilidade, verificando a robustez e a coerência do modelo ajustado.

CAPÍTULO 1 – RISCO E INCERTEZA NA TOMADA DE DECISÃO NA INDÚSTRIA DO PETRÓLEO

Empresas de exploração e produção de petróleo enfrentam no contexto atual o desafio de alocar de maneira otimizada os recursos financeiros para o investimentos em seus projetos. Este cenário é agravado ainda mais pela característica de incerteza e risco envolvidos nos novos investimentos. Os métodos tradicionais de avaliação de alternativas de investimentos baseiam-se no montante e no tempo do fluxo monetário, ignorando a habilidade e o desejo da empresa de assumir o risco do projeto (WALLS, 1995). A teoria de utilidade (preferência) combina as técnicas tradicionais de avaliação de projetos, método do valor presente (VPL), com a análise de decisão baseada nas preferências em relação ao risco. Este modelo integrado permite que as empresas quantifiquem e incorporem os riscos financeiros, tecnológicos, ambientais, recursos humanos, mercado e outros, associados com o processo de exploração e produção de petróleo.

Situações de decisões geralmente envolvem mais que um simples evento de incerteza, complicando-se quando os eventos de incertezas dependem de outros fatores. Por exemplo, o preço de uma determinada commodities tende a aumentar se a economia como um todo continua a crescer ou se o mercado de commodities em geral tem uma aumento de valor. Assim, existe uma interdependência entre as incertezas que devem ser consideradas pelo tomador de decisão.

A análise de decisão é um procedimento sistemático que transforma problemas de decisões opacos em problemas de decisões transparentes através de uma seqüência de etapas transparentes (HOWARD, 1988). Em outras palavras, a análise de decisão possibilita a transformação da complexidade de uma decisão em um curso de ação simples e desejado pelo tomador de decisão.

1.1 ELEMENTOS DA TEORIA DE DECISÃO

As decisões estão presentes em todo instante em nossas vidas. Todos os dias decidimos qual roupa usar, escolhemos o trajeto para o nosso trabalho, decidimos em qual restaurante almoçar, etc. No cotidiano, a maioria das decisões não requer o auxílio de modelos. Por outro lado, segundo EHRLICH (1996), os modelos são um grande apoio quando a decisão envolve muitas alternativas e distintos objetivos e necessita ser compartilhada por um grande número de pessoas.

De uma maneira geral no processo decisório, o investidor se defronta com dois objetivos: maximizar o retorno esperado e minimizar o risco. A intuição do analista é importante, mas insuficiente, pois não possibilita uma revisão e uma análise da qualidade das decisões passadas quando os objetivos acima mencionados estão envolvidos de forma nem sempre harmônica.

Segundo HOWARD (1988), a análise de decisão é definida como uma disciplina que compreende a filosofia, a teoria, a metodologia e a prática profissional para formalizar importantes decisões. Por outro lado, KEENEY (1982) define de forma mais intuitiva, como a formalização do senso comum para problemas de decisão, os quais são muito complexos para o uso informal do senso comum.

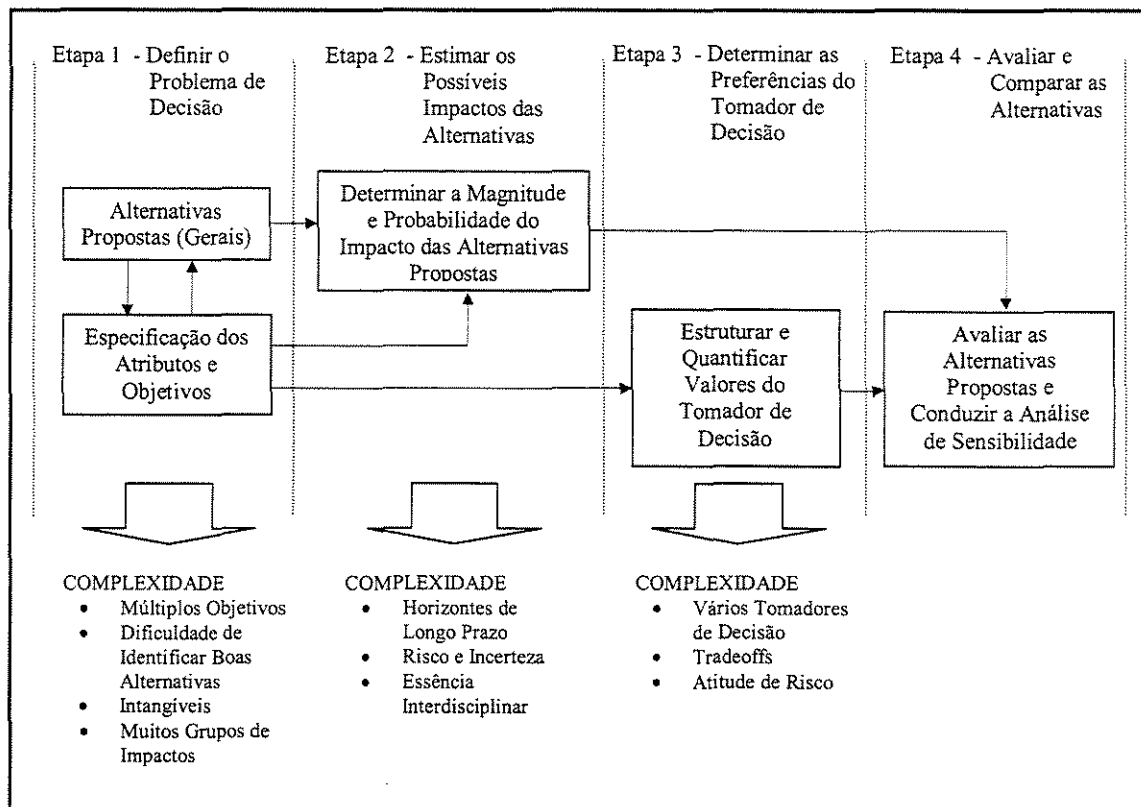
É necessário ressaltar que as técnicas de análise de decisão não visam eliminar nem reduzir o risco inerente às atividades de exploração e produção de petróleo. Trata-se de uma ferramenta para auxiliar o tomador de decisão na quantificação e no entendimento dos riscos, para que a empresa possa de forma racional avaliar o seu nível de exposição aos mesmos.

Um processo de decisão começa pela identificação do que nós desejamos, do que é possível fazer (alternativas) e da informação de que dispomos. Espera-se que estes elementos, ordenados em uma estrutura lógica, resultem na melhor decisão possível. Quanto ao resultado, é preciso esperar que o acaso resolva as incertezas.

A análise de decisão pode ser decomposta em quatro etapas (Fig. 1.1):

- i- definir que possíveis resultados poderão ocorrer para cada uma das escolhas de decisão disponíveis ou alternativas;
- ii- avaliar lucros ou perdas para cada resultado e estimar a probabilidade de ocorrência de cada alternativa;
- iii- determinar a preferência do tomador de decisão;
- iv- calcular lucro médio ponderado para cada escolha de decisão em que os fatores de ponderação são as respectivas probabilidades de ocorrências de cada resultado. Denominamos este lucro médio ponderado de valor esperado da decisão alternativa, como o critério comparativo usado para aceitar ou rejeitar uma alternativa.

A Figura 1.1 ilustra a interdependência das etapas da metodologia de análise de decisão. Para interpretar as implicações entre estas etapas, é importante considerar a interação entre elas, são como a possibilidade de ocorrência de decisões concentradas em outras etapas, com a exclusão de algumas. Segundo KEENEY (1982), estes procedimentos podem ser encontrados na avaliação de objetivos de uma corporação e na alocação de capital em um projeto de engenharia.



Fonte: KEENEY (1982)

Figura 1.1 – Representação esquemática dos passos da análise de decisão

A primeira etapa consiste em definir o problema de decisão, discutindo e levantando as informações necessárias para caracterizar de forma clara os principais objetivos da decisão a ser tomada. É necessário muita atenção e cuidado nesta etapa, pois o processo decisório estará baseado nos objetivos definidos neste momento. Após identificadas as alternativas e especificado os objetivos, avalia-se os lucros e as perdas de cada resultado possível, atribui-se as probabilidades de ocorrência de cada alternativa, atingindo-se assim a etapa 2 com a estrutura de decisão.

Com estas duas etapas realizadas, o problema de decisão está praticamente definido, faltando apenas impor ao modelo as preferências do decisor ou da empresa em relação ao risco. Na terceira etapa, através de entrevistas e levantamentos de dados, é determinado qual é o comportamento da empresa frente as decisões que envolvem risco. Este processo de definir a atitude em relação ao risco é um bastante complexo, porque o ser humano geralmente não comporta-se de forma lógica quando é preciso decidir em um ambiente que

envolve incertezas e riscos. CLEMEN (1990), BAIRD (1989) e KIRKWOOD (1996) apresentam algumas técnicas de quantificar probabilidades subjetivas e as preferências em relação ao risco através de um método empírico.

A etapa 4 pode ser considerada efetivamente como decisão. Nesta etapa, o modelo definido nas três etapas anteriores é aplicado, e as alternativas são comparadas, classificando-as de forma que o decisor escolha a alternativa que melhor caracterize os objetivos definidos previamente. Uma análise de sensibilidade é efetuada para verificar a consistência do modelo com as preferências e objetivos. Caso o resultado não seja consistente com variações freqüentes em relação às variáveis, o modelo deve ser reformulado, começando pela primeira etapa até a obtenção de um modelo que atenda às necessidades do problema decisório.

A análise de decisão é um processo iterativo. O modelo deve ser ajustado até que seja consistente com objetivos e preferências de um grupo ou de um indivíduo responsável por uma decisão.

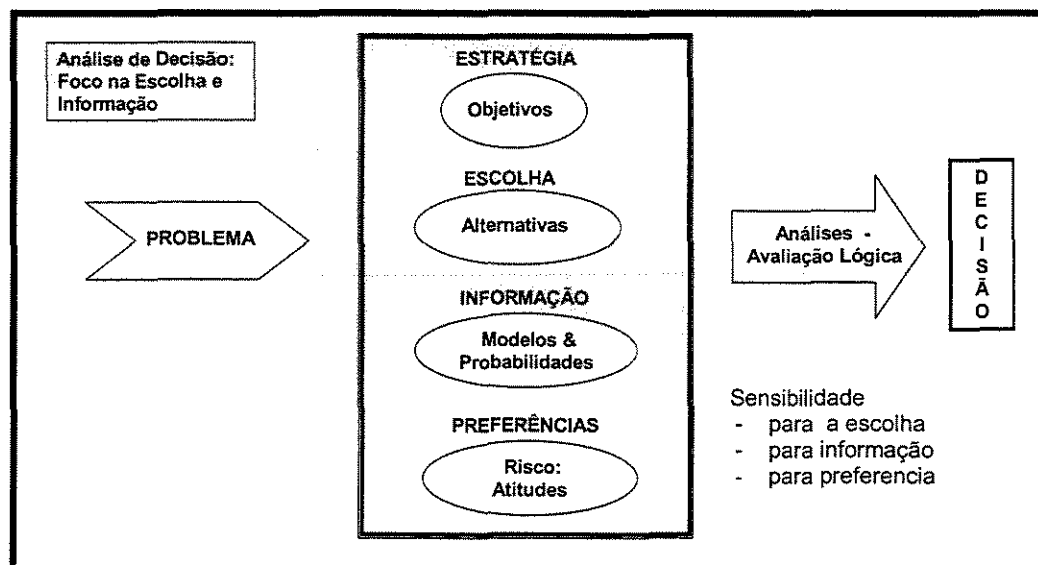
A realização destas etapas só tem sentido se a decisão for tomada em um ambiente de incertezas e riscos, caso contrário basta quantificar as alternativas de forma adequada e compará-las, escolhendo a opção que maximiza o retorno esperado. Quando não existe incerteza sobre os resultados de uma decisão, a complexidade envolve a avaliação das alternativas considerando o *tradeoff*¹ entre elas. Já quando existe incerteza sobre qual o resultado de alternativa selecionada, então uma simples avaliação das variáveis torna-se ineficiente, necessitando de um método mais complexo para a tomada de decisão (CLEMEN, 1990; KIRKWOOD, 1996; CASEY, 1994).

Um dilema chave em muitas decisões aonde existem múltiplos atributos provém do fato de que alternativas com um bom desempenho em relação a alguns atributos, tem um desempenho ruim com respeito a outros. Não há primazia clara entre as alternativas, e é necessário considerar os *tradeoffs* entre os atributos para determinar qual alternativa é a

¹ A relação de *tradeoff* entre duas variáveis pode ser entendida como a atribuição de um peso mais significativo de um variável em detrimento de outra. Nem sempre essa forma de compensação conduz a recompor a somatória anterior, pois algumas variáveis apresentam uma relação não-linear.

preferida. Um outro modo de caracterizar esse procedimento é que as alternativas preferidas dependem do pesos que são atribuídos para vários atributos.

Uma descrição formal do problema de decisão é caracterizado como a base compreensiva da decisão elaborada por HOWARD (1988) e depois adaptada por WALLS (1995). A base compreensiva da análise de decisão consiste na especificação quantitativa de quatro elementos fundamentais do problema de decisão (Figura 1.2): a estratégia, a escolha, a informação e as preferências do tomador de decisão ou da firma. Cada um desses componentes podem ter variações no grau de complexidade. Estruturar o problema de decisão requer que a firma especifique uma estratégia definida através de um grupo de objetivos bem como atributos individuais para medir a realização destes objetivos.



Fonte: HOWARD (1988)

Figura 1.2 - Bases da análise de decisão

O elemento escolha consiste na identificação das alternativas propostas ou estimadas. Na fase de informação, o analista estima o impacto de cada alternativa no grupo de objetivos. Esta fase pode envolver horizontes de longo prazo, informação probabilística sobre os resultados e dependência probabilística entre os atributos para alternativas diferentes. A fase da avaliação das preferências concentra-se na medição formal dos valores de *tradeoff* do tomador de decisão entre os objetivos e as atitudes de risco. Esta

medição é realizada de forma subjetiva, através de entrevistas com os responsáveis pela decisão. Valores de *tradeoffs* e atitudes de risco são particularmente complicadas por que não existe certo ou errado. Basicamente, é preciso uma função objetiva que agregue os atributos e as atitudes em relação ao risco da firma. Na análise de decisão, esta função objetivo é conhecida como função de utilidade.

O modelo de decisão com múltiplos critérios tem como principal objetivo auxiliar o tomador de decisão a decidir em ambiente de risco e incerteza, aonde as variáveis analisadas atuam de forma conflitante. Este conflito pode ser positivo ou negativo de acordo com o comportamento das variáveis. Quando o conflito entre duas variáveis é positivo, o resultado obtido com o modelo de decisão será maior quando os atributos interagem, isto é, o modelo que apresenta os atributos isoladamente tem um resultado inferior ao do modelo múltiplo. Já quando a interação é negativa ocorre o inverso, ou seja, o modelo com os atributos interagindo tem um pior resultado do que do modelo unidimensional. Para exemplificar estas características dos atributos, suponha uma empresa que trabalhe com vendas de combustível, vendendo álcool e gasolina. Em um dado mês, devido uma campanha publicitária do governo, o álcool vendeu muito mais do que o costume, causando uma diminuição do consumo de gasolina. Este tipo de situação não interfere na estrutura do estabelecimento, pois o principal objetivo do posto de combustível, a grosso modo, é manter ou aumentar o seu faturamento, independente de qual combustível foi vendido. Este é o conflito positivo entre atributos. Para exemplificar um conflito negativo, imagine uma empresa que produz petróleo em alto mar. Uma forma de aumentar o lucro é produzir mais, pois a demanda é maior que a oferta. Para produzir uma quantidade maior, a empresa precisa usar técnicas que degradem o meio ambiente. Neste caso, a empresa tem que decidir se aumenta a produção, denegrindo a sua imagem na sociedade, ou então, mantém sua boa imagem não aumentando o faturamento. Estes conceitos de comportamento dos atributos serão melhor explorados no Capítulo 2.

De um modo geral, as decisões não podem ser baseadas somente em atributos financeiros, ou seja, em custos e benefícios obtidos através de um investimento. No planejamento moderno de uma empresa de petróleo, questões como desenvolvimento tecnológico, recursos humanos, fatores políticos, impacto ambiental entre outros, são

fatores fundamentais na hora de decidir aonde, como e quanto investir o seu capital. Quando as decisões eram baseadas somente em atributos financeiros, a unidade de medida era o valor monetário esperado (VME²), mas com inclusão de novas variáveis, esta medida não consegue mais atingir os objetivos. Por exemplo, como quantificar o ganho tecnológico em função de um valor monetário? Qual é o ganho monetário com o desenvolvimento dos recursos humanos dentro da empresa? E como expressar estas medidas atribuindo risco aos atributos?

Para responder estes desafios, os pesquisadores propuseram algumas ferramentas analíticas como a função utilidade. Na teoria microeconômica, utilidade refere-se a habilidade inata de um serviço proporcionar satisfação ao consumidor, isto é, utilidade é a medida do benefício ou da satisfação subjetiva que um consumidor deriva do consumo de importâncias de diferentes serviços (BAIRD, 1989). Na Seção 1.4 será melhor explorada a questão da utilidade e as suas aplicações na exploração e produção de petróleo.

1.1.1 ÁRVORE DE DECISÃO

Quando a análise de decisão é aplicada em um problema atual, o processo de decisão pode se tornar muito complexo e de difícil visualização. O decisor tem que identificar os valores para cada alternativa e estimar as probabilidades associadas a cada resultado, mantendo a seqüência dos mesmos e das decisões em uma ordem cronológica. Para auxiliar a visualização do problema utiliza-se um diagrama denominado árvore de decisão, proporcionando ao tomador de decisão uma estrutura lógica do mesmo.

Vamos supor que uma empresa detentora de uma área para explorar e produzir petróleo tenha que decidir se deve perfurar ou não um poço após ter feito uma aquisição de dados sísmicos. A Figura 1.3 representa a árvore de decisão deste cenário.

² O VME é definido pela soma do montante de capital ganho ou perdido se cada resultado ocorrer multiplicado pela sua probabilidade de ocorrência.

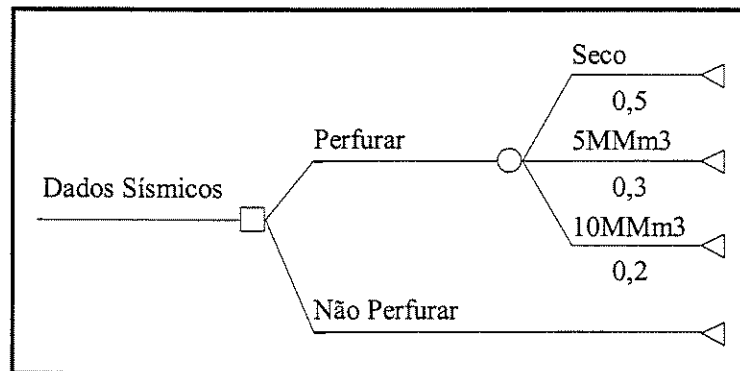


Figura 1.3 – Árvore de decisão de perfurar ou não um poço (valores esperados de produção em milhões de m³ de óleo (MMm³))

Existem dois nós na árvore de decisão. No primeiro nó (quadrado), nó de decisão e ou atitude, o gerente tem que decidir se perfura ou não o poço de acordo com o resultado dos dados sísmicos. Este nó é denominado *ação*. Caso a decisão seja por não perfurar, o processo termina, não tendo nenhum lucro ou prejuízo para a empresa. Se a decisão for por perfurar o poço, então o processo alcança o segundo nó (redondo), denominado *evento*. Neste caso temos um evento com três possibilidades de ocorrência para característica do poço: seco, 5MMm³ e 10MMm³ com probabilidades de 0,5, 0,3 e 0,2 respectivamente. Para representar totalmente o problema falta atribuir os valores monetários de cada um dos ramos da árvore de decisão. A Tabela 1.1 apresenta resumo de dados necessários para o cálculo do valor monetário esperado (VME) da decisão de perfurar ou não um poço. Com a definição dos parâmetros do problema de decisão, o VME será o critério de decisão entre perfurar ou não o poço.

$$VME_{\text{perfurar}} = 0,5 \times (-70.000) + 0,3 \times (50.000) + 0,2 \times (200.000) = \$20.000,00$$

$$VME_{\text{não perfurar}} = 1,0 \times 0 = \$0,00$$

Tabela 1.1 – Resumo de dados da decisão de perfurar ou não um poço de petróleo

AÇÃO	EVENTO	PROBABILIDADE	VALOR MONETÁRIO
	POÇO SECO	0,5	(\$70.000,00)
Perfurar	5MMm ³	0,3	\$50.000,00
	10MMm ³	0,2	\$200.000,00
Não perfurar	-----	1,0	\$0,00

A melhor decisão neste caso é perfurar o poço, pois o $VME_{\text{perfurar}} > VME_{\text{não perfurar}}$ é positivo. O VME não mede a exposição da empresa ao risco, ou seja, caso decida-se perfurar o poço, existem três possibilidades de resultados: seco, 5MMm³ e 10MMm³, podendo gerar um elevado lucro ou uma perda considerável.

A probabilidade do poço estar seco é de 50% e o valor monetário associado a este resultado é de -\$70.000,00. Dependendo da estrutura financeira da empresa, pode comprometer seus investimentos. Para evitar esta falha, as preferências em relação ao risco devem ser incorporadas no modelo de decisão baseado na capacidade da empresa em assimilar grandes prejuízos. A Seção 1.1.3 discute os tipos de comportamento que caracterizam as decisões e como podem ser incluídos no processo decisório.

A Figura 1.3 é uma representação simplificada dos resultados de um modelo de decisão, pois uma árvore de decisão completa indica o melhor resultado que se pode obter e qual o caminho seguir. Um modelo mais completo pode ser visualizado na Figura 1.4, aonde apresenta-se os valores monetários e as probabilidades de ocorrência de cada um dos possíveis resultados, o VME de cada nó e o VME do melhor resultado.

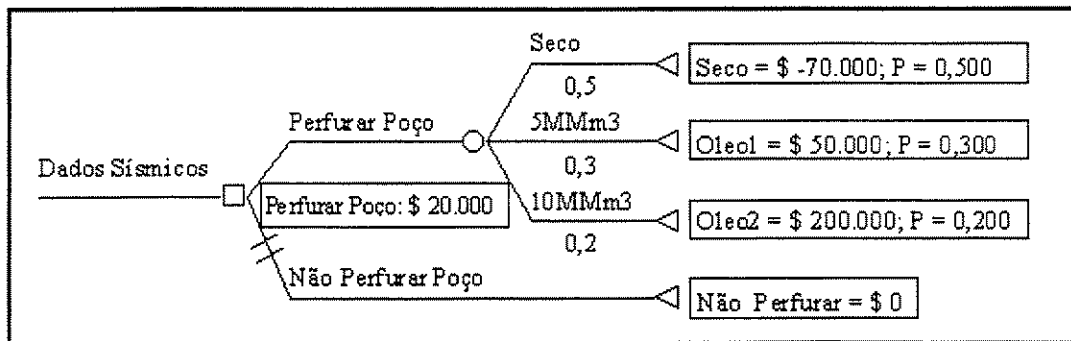


Figura 1.4 – Árvore de decisão completa de perfurar ou não um poço

Pode-se perceber que a árvore de decisão pode ser definida como um diagrama que ilustra a ordem cronológica de ações e eventos em um problema de decisão aonde cada ação e cada evento é representado por um ramo da árvore.

O uso da árvore de decisão ajuda nas considerações das alternativas e na elucidação da natureza dos riscos e das incertezas do problema de decisão. Este método de representação, portanto, contribui na qualidade das decisões que serão tomadas.

1.1.2 RISCO E INCERTEZA: AS PRINCIPAIS DIFERENÇAS

Na metodologia de análise de decisão não está muito claro a definição e utilização de alguns termos. O conceito de incerteza confunde-se muito com risco e vice versa. Estas definições variam de autor para autor. Estes dois conceitos são muito importantes na teoria de análise de decisão. Nesta seção será apresentado algumas definições de risco e incerteza, além de discutirmos as incertezas no processo de exploração e produção de petróleo.

Segundo WHITNEY & WHITNEY (1978), a incerteza ocorre quando uma gama de possíveis resultados podem ser definidos, mas a probabilidade de obter um certo resultado não pode ser estabelecida. Estes autores consideram que o risco envolvido em uma análise econômica inclui a informação de probabilidade e de incerteza. Por sua vez, GENTRY & O'NEIL (1984), consideram que existem dois tipos de decisões: decisão sob incerteza, onde

as probabilidades de vários resultados são desconhecidas; e decisão sob risco, onde tais probabilidades podem ser estimadas.

Diz-se que há risco quando a incerteza é suficiente para conduzir o decisor a uma escolha incorreta diante de eventos subsequentes (DIAZ GALEANO, 1998). Este autor também classifica o risco como sendo um evento com possibilidades incertas, ligadas a probabilidades conhecidas, e na situação de incerteza, as chances de ocorrência de um evento tem probabilidade desconhecidas ou indeterminadas. Segundo STERMOLE & STERMOLE(1993), a diferença entre risco e incerteza reside no conhecimento das probabilidades de ocorrência dos valores assumidos pelas variáveis estratégicas, usadas na análise de risco. Existe risco quando distribuição de probabilidade é conhecida; caso contrário, tem-se incerteza.

No mundo dos negócios são encontrados uma gama muito variada de situações que envolvem decisões. O método analítico que será usada em cada situação depende muito do ambiente em que a decisão será tomada. Segundo GROEBNER & SHANNON (1993), as decisões são tomadas em dois ambientes primários: certeza e incerteza.

Algumas vezes são encontradas situações de decisão onde existe certeza no resultado de cada alternativa. Este cenário, onde os resultados de cada alternativa são conhecidos antes da decisão ser tomada, é denominado ambiente certo. Neste ambiente, as decisões não envolvem risco, o decisor tem o conhecimento exato de cada alternativa, bastando apenas escolher aquela que proporciona o maior retorno. As técnicas de avaliação econômica operam de forma bastante eficiente neste cenário.

No contexto econômico atual é muito raro encontrar um evento futuro com certeza absoluta. As incertezas nos fatores de mercado como preços, salários, demanda, custos e outros que envolvem o fluxo de caixa de um projeto de investimentos, tornam praticamente impossível prever fluxos com exatidão.

No ambiente de incerteza, uma alternativa é selecionada sem ter o conhecimento probabilístico do resultado. Incertezas existem em decisões onde os possíveis resultados são conhecidos, mas as probabilidades associadas com estes resultados não. Virtualmente,

todas as decisões importantes são feitas sob condições de incertezas. A tomada de decisão sob incerteza implica na existência de pelo menos dois possíveis resultados que poderiam ocorrer se um curso particular de ação for escolhido. Os métodos de avaliação econômica são ineficazes neste tipo de situação, pois não consideram a preferência do decisor quando exposto ao valor do dinheiro, conforme será visto mais adiante na Seção 1.2.3. É neste ambiente que é aplicado a metodologia de análise de decisão, fornecendo ao decisor ferramentas adequadas para avaliar de forma sistemática e tomar a melhor decisão.

Os tomadores de decisão devem também estar atentos que em um ambiente de incertezas, mal resultados podem ocorrer e que existe uma diferença entre boa decisão e bom resultado. Nem sempre uma boa decisão tem um bom resultado. O principal objetivo da análise de decisão é focalizar em uma boa tomada de decisão, a qual em longo prazo pode resultar em um aumento de bons resultados.

Suponha que um indivíduo deseje comprar um carro tendo preferência pela cor cinza e de uma certa marca A. Esta pessoa vai a loja e descobre que o carro da marca A na cor cinza está em falta devendo chegar entre um e vinte dias, dependendo da montadora cumprir o prazos de entrega dos veículos, mas existe na loja um carro da marca B na cor cinza pronta entrega. Apesar da cor agradar o cliente, a marca B não é a preferida. Qual deve ser o caminho a seguir pelo comprador? Caso decida comprar o carro B, o indivíduo já poderá usufruir do carro novo no dia seguinte. Se decidir esperar o carro A, existe a incerteza de quando o carro vai chegar, podendo ficar mais de uma semana esperando pelo carro novo.

Para decidir que carro comprar é necessário avaliar qual a urgência do cliente em possuir o automóvel. Caso o cliente necessite do produto imediatamente, a decisão correta é escolher o carro B, independente de quando o carro A vai chegar, o que pode acontecer no dia seguinte. Se o comprador pode esperar, então a melhor decisão é aguardar a entrega do carro A, ignorando o carro B e assumindo o risco de ficar até vinte dias sem o carro.

O risco no contexto da teoria de decisão pode ser definido como um resultado imprevisto de valores esperados de um fluxo de caixa de um projeto. As fontes de

incertezas são em função de uma série de fatores, como a quantidade de óleo e gás em um poço, o tamanho do reservatório, o custo de operação, qualidade do óleo, etc.

1.1.3 COMPORTAMENTO FRENTE AO RISCO

Um dos motivos pelo qual as técnicas de avaliação econômica não são eficientes quando aplicadas em ambientes de incerteza decorre do fato que as pessoas possuem comportamentos diferentes em decisões sob risco. Nem todas as pessoas selecionam a mesma alternativa quando estão em face com o mesmo problema de decisão. Estas atitudes podem ser denominadas como comportamento ou tolerância ao risco e classificadas como:

- Aversão ao risco
- Indiferença ao risco
- Propensão ao risco

É muito importante na hora de formular o modelo de decisão definir qual o tipo de comportamento a pessoa ou a empresa possui face ao risco. Este comportamento pode variar de pessoa para pessoa e de situação para situação. Esta definição torna-se ainda mais complicada e complexa quando um grupo de pessoas é responsável por uma decisão. O comportamento em relação ao risco varia devido a interpretação e visão diferenciada de cada um dos envolvidos na escolha da melhor alternativa, podendo gerar conflitos de opiniões. É necessário e muito importante definir este comportamento de forma bem clara, pois uma das bases do modelo final deriva de como cada decisor encara o risco.

Quando uma decisão é baseada somente no VME, como visto no exemplo da Seção 1.1.1, é dito que o tomador de decisão é neutro ao risco, ou seja, é indiferente a exposição monetária em qual a empresa é exposta. Neste caso, as decisões não levam em conta a magnitude que o possível resultado indesejado pode atingir.

O comportamento mais comum encontrado nas principais decisões é o de aversão ao risco. Neste caso o decisor aceita um valor mínimo sem risco para não ter que participar

(desistir) do processo decisório. Este valor é denominado como equivalente certo. O equivalente certo do gerente indiferente ao risco é o próprio VME. Quando o decisor é avesso ao risco, o equivalente certo é menor que VME. A diferença entre VME e o equivalente certo é prêmio de risco, ou seja, o custo em dinheiro da incerteza (Figura 1.5).

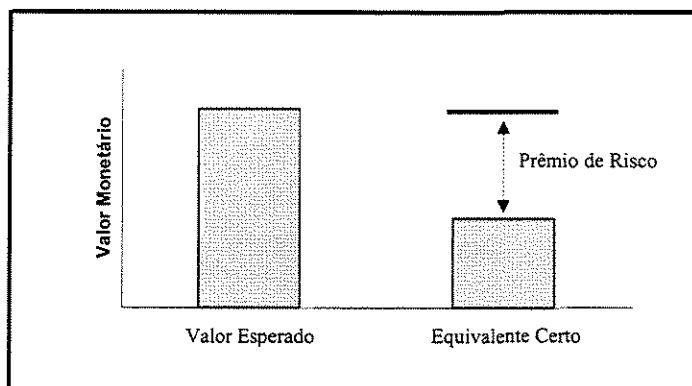


Figura 1.5 – Definição de Equivalente Certo e Prêmio de Risco

Um comportamento mais difícil de ser encontrado é quando o decisor é propenso ao risco. Neste caso o equivalente certo do tomador de decisão é maior que o VME, ou seja, o decisor deseja receber um valor maior que VME para desistir do processo decisório. O prêmio de risco, neste caso, é negativo. Esta é uma situação muito rara, pois as empresas quando envolvidas em grandes quantias monetárias são naturalmente avessas ao risco.

1.2 AS INCERTEZAS NO PROCESSO DE EXPLORAÇÃO E PRODUÇÃO DE PETRÓLEO

Na atualidade, o setor petrolífero está passando por uma reestruturação econômica, entre outros fatores, devido a alta concorrência entre as empresas, a instabilidade dos preços do barril de óleo bruto e a restritiva legislação ambiental. O mercado está exigindo cada vez mais que as empresas tornem-se competitivas e desenvolvam tecnologias eficientes que diminuam o custo de operação e não violem as normas ambientais vigentes no país. Devido a restrição orçamentaria das empresas, as ferramentas sistemáticas vem sendo cada vez mais utilizadas na avaliação de uma decisão.

Os riscos envolvidos no processo de exploração e produção de petróleo envolvem uma série de categorias Segundo DIAZ GALEANO (1998) as fontes de risco podem ser classificadas em treze categorias. As principais categorias que devem ser destacadas para a tomada de decisão são: o risco geológico (probabilidade ou não da existência de campos petrolíferos); o risco econômico (tamanho dos campos a serem descobertos e produzidos, custo de exploração e produção e preços do petróleo no mercado) e o risco financeiro (capacidade financeira da empresa suportar perdas).

O risco geológico inclui a incerteza referente a descoberta de uma jazida produtora de hidrocarbonetos. Com a estimativa das probabilidades de existência de petróleo em uma determinada área, o risco também passa a ser econômico (estimativa do volume de óleo existente seguida da análise econômica). Neste caso são adicionadas probabilidades dos volumes contidos e calculado os prováveis custos e as receitas para cada perfil de produção. A terceira categoria, risco financeiro, decorre da análise dos riscos anteriores. Esta fonte de incerteza está associada desde a possibilidade de falta de fundos necessários para o financiamento do projeto até a possível falência da empresa no não cumprimento de obrigações previstas de pagamento.

Estas fontes de incerteza demonstram a importância de uma decisão bem tomada. Dependendo da escolha feita pelo tomador de decisão, a empresa pode falir ou agregar uma grande riqueza. A partir do momento que é feita a análise de risco cuidadosa baseada nos objetivos da empresa, a possibilidade de trilhar um caminho errado vai diminuindo, aumentando a chance da empresa acrescentar riquezas.

Como o montante necessário na exploração e produção de petróleo é muito alto, fica evidente a necessidade de incorporar a análise de risco no processo decisório, e o mais importante é caracterizar o modelo de decisão de acordo com as preferências da empresa. Desta forma, evita-se um julgamento baseado na intuição do gerente e obriga-se que a decisão seja sistemática, procurando manter coerência com as aspirações da empresa.

As empresas do setor petrolífero vem utilizando a análise econômica como um critério de decisão consistente, que proporciona uma ferramenta para medir a viabilidade de um projeto. Esta é uma solução muito usada para a escolha da melhor alternativa ou

também pode ser usada como um critério de seleção de uma alternativa (NEWENDORP, 1975).

1.3 TEORIA DA UTILIDADE

Até agora, supusemos que o critério de decisão correspondia à maximização do valor monetário esperado ou à minimização de uma perda monetária esperada. No entanto, sabemos que as pessoas ou entidades não pautam suas decisões pura e simplesmente tendo em vista somente estes valores como base. Nos métodos que foram apresentados anteriormente somente a incerteza foi incorporada no modelo de decisão, mas sabemos que o componente risco desempenha um importante papel na análise. Assim sendo, é necessário assentar as preferências reais das pessoas ou entidades quanto aos resultados oriundos de suas decisões, sendo este o escopo principal de Teoria da Utilidade.

Uma forma conveniente de expressar a preferência em relação ao risco é através da função utilidade definida por VON NEUMANN & MORGENTERN (1953) e PRATT (1964). A função utilidade é construída atribuindo-se um valor numérico maior para o melhor resultado possível e um valor menor para um evento menos preferível. A obtenção de valores numéricos intermediários permite construir a curva da função utilidade, que é única para cada tomador de decisão.

O fundamental é considerar que cada decisor possui sua própria função utilidade. Esta função associa aos prêmios monetários, valores de uma quantidade abstrata chamada utilidade, de modo conveniente a representar o comportamento real do decisor perante situações de risco. Uma outra vantagem da Teoria da Utilidade está em poder analisar situações em que os prêmios são qualitativos, sendo estes substituídos por valores de utilidade (numéricos).

Quando o risco não é incorporado nas decisões, o valor monetário esperado é o critério de escolha entre alternativas incertas. Em decisões com risco eminente, passa a ser necessário incluir um critério que assuma esta característica. Na Teoria de Utilidade, este critério é chamado de equivalente certo da decisão em questão, que nada mais é que uma

quantia garantida que o decisor está disposto a receber em troca para abandonar a loteria (Seção 1.2.3). Diversos indivíduos terão diferentes equivalentes certos para uma mesma loteria, como reflexo do fato de que diferentes pessoas ou entidades reagem diferentemente em relação ao risco.

Conforme visto anteriormente cada pessoa comporta-se de forma particular frente ao risco, ou seja, cada decisor tem a sua própria função utilidade. Lançando em um gráfico o valor monetário *versus* as curvas de utilidade os níveis de tolerância ao risco, tem-se uma reta para o decisor indiferente ao risco, uma curva com concavidade para baixo para o decisor avesso ao risco e uma curva com concavidade para cima para um decisor propenso ao risco (Figura 1.6).

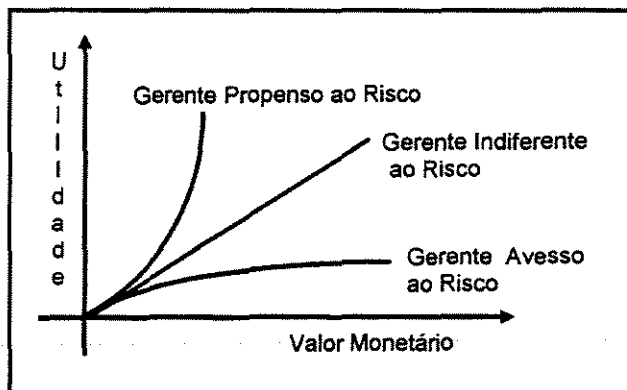


Figura 1.6 – Função Utilidade frente ao risco

A Teoria da Utilidade é definida sob certas condições. Respeitando estas condições é possível representar coerentemente as preferências de uma pessoa ou de entidades em relação ao risco através da função utilidade. Para que essa função possa ser definida corretamente, é necessário que seis axiomas sejam válidos, ou seja, que o agente decisório apresente um comportamento compatível com os axiomas (VON NEUMANN & MORGENSTERN, 1953; CLEMEN, 1990; BEKMAN & COSTA NETO, 1993; KENNEY & RAIFFA, 1976).

1.3.1 AXIOMAS DA TEORIA DE UTILIDADE

Para expressar os axiomas da teoria de utilidade considere a seguinte notação:

$A \succ B$: A é preferível em relação a B

$A \sim B$: A é indiferente em relação a B

$A \prec B$: B é preferível em relação a A

Por outro lado, $[A, p ; B, 1-p]$ representa uma loteria que leva ao prêmio A com probabilidade p ou ao prêmio B com probabilidade 1-p.

Os axiomas da teoria de utilidade são os seguintes:

- a. Ordenabilidade: dados os prêmios A e B, ou $A \succ B$, ou $A \sim B$, ou $A \prec B$;
- b. Transitividade: se $A \succ B$ e $B \succ C$, então $A \succ C$;
- c. Continuidade: se $A \succ B \succ C$, então existe p, $0 < p < 1$, tal que $B \sim [A, p; C, 1-p]$;
- d. Substituibilidade: Se $A \sim B$, então $[A, p; C, 1-p] \sim [B, p; C, 1-p]$;
- e. Redutibilidade: $[[A, p; B, 1-p], q; B, 1-q] \sim [A, pq; B, 1-pq]$;
- f. Monotonicidade: se $A \succ B$, então $[A, p; B, 1-p] \succ [A, q; C, 1-q]$ se e somente se $p > q$.

Aplicando estes axiomas na função utilidade tem-se:

- i- $A \succ B \Leftrightarrow u(A) > u(B)$;
- ii- $A \sim B \Leftrightarrow u(A) = u(B)$;
- iii- $A \prec B \Leftrightarrow u(A) < u(B)$;
- iv- $U([A, p; B, 1-p]) = pu(A) + (1-p)u(B)$

Segue-se ainda que, se $u(X)$ é uma função de utilidade com as propriedades i e iv, então $u'(X) = r + su(X)$, onde r e $s > 0$ são constantes, também é uma função de utilidade equivalente a $u(x)$.

1.3.2 DEFINIÇÃO DA TEORIA DE UTILIDADE

A função utilidade pode ser definida empírica ou analiticamente. A definição empírica se dá através de uma entrevista, podendo ser determinada em dois passos (NEPOMUCENO & SUSLICK, 2000).

- 1) Estabelecem-se as utilidades para dois valores monetários arbitrários. A utilidade da melhor consequência é estabelecida como sendo mais alta do que a utilidade do pior evento. Mostra-se que os resultados finais das análises não dependem dos dois números escolhidos, desde que a utilidade da melhor consequência seja estabelecida como maior do que a utilidade do pior evento (NEPOMUCENO & SUSLICK, 1996).
- 2) Nesta etapa, oferece-se ao tomador de decisão a escolha entre a certeza de um valor monetário e um jogo em que os resultados possíveis são os dois valores monetários cujas utilidades foram estabelecidas arbitrariamente. Para isso pergunta-se ao decisor se ele prefere a certeza do valor B ou o jogo em que existam a probabilidade p de ganhar A e a probabilidade $(1-p)$ de perder C (Figura 1.7). Tentam-se vários valores de p até achar aquele ao qual o decisor é indiferente entre a certeza de B e o jogo. Essa deve ser a utilidade esperada de B, que é igual à utilidade esperada do jogo, pois o decisor coerente maximiza a utilidade esperada.

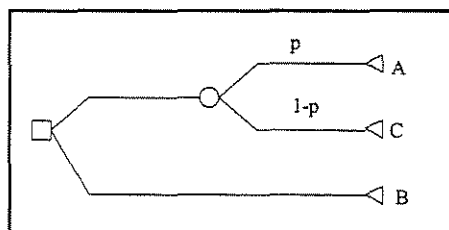


Figura 1.7 – Determinação empírica da função utilidade

Quando estes dados são dispostos em um gráfico temos a curva de preferência do tomador de decisão, conforme visto na Figura 1.6.

Alternativamente a função utilidade pode ser definida utilizando-se expressões analíticas, como nos seguintes exemplos:

(a) linear: $u(x) = cx$

(b) exponencial: $u(x) = -e^{-cx}$

(c) logarítmica: $u(x) = \ln(x+c)$, $c > 0$, $x > -c$

(d) raiz quadrada: $u(x) = \sqrt{x+c}$, $c > 0$, $x > -c$

(e) logística: $u(x) = \frac{1}{a - be^{-cx}}$

1.3.2.1 Utilidade Esperada

A utilidade esperada pode ser definida como a soma das utilidades de cada resultado que ocorre multiplicado pela probabilidade de ocorrência de cada resultado. Este é o mesmo conceito do valor monetário esperado. As decisões são baseadas na maximização da utilidade esperada. Esta medida foi estabelecida por VON NEUMANN & MORGENTERN (1953). Todo o processo decisório que antes se baseava no VME, agora se baseará no valor de utilidade esperada.

1.3.2.2 Alguns Cuidados

Alguns procedimentos necessitam ser feitos quando se operam com utilidades envolvidas em problemas de decisão.

1. Utilidades não somam. Isto é, $U(A+B) \neq U(A) + U(B)$. Este é o real motivo de ter uma função de utilidade não linear. Assim, quando as utilidades são usadas no processo de decisão, é obrigatório calcular os valores de

monetários ou suas contribuições nos pontos finais da árvore de decisão antes de transformar em valores de utilidades.

2. Diferenças entre utilidades não expressam a força das preferências. Suponha que $U(A_1) - U(A_2) > U(A_3) - U(A_4)$. Isto não significa necessariamente que deva preferir ir de A_2 para A_1 ao invés de A_4 para A_3 . Utilidade apenas proporciona uma escala numérica para ordenar as preferências. Por exemplo: você primeiro contou que receberá \$100, e então observou que realmente receberá \$500, e então finalmente constatou que o pagamento real será de \$10.000. Sem dúvida será uma surpresa agradável ir de \$100 para \$500, mas para a maioria de nós, o deleite de experimentar receber \$10.000 ao invés de \$500, ofuscará a diferença entre \$100 e \$500. Se todos concordam ou não, é necessário interpretar cuidadosamente este aspecto da utilidade.
3. Utilidades podem não ser comparáveis de pessoa para pessoa. Uma função de utilidade reflete um estado subjetivo da preferência de um indivíduo, e desta forma não é possível equiparar utilidades entre pessoas. Suponha que um indivíduo decida comprar um carro e que ele considere como fator mais importante a cor e os acessórios que estão inclusos no veículo, portanto para ele estes itens possuem um alto valor de utilidade. Para outra pessoa, o mais importante é o preço que será pago pelo automóvel, independente da cor e dos acessórios, ou seja, o preço tem uma utilidade maior que os outros itens. Desse modo é notório que os valores de utilidade para as duas pessoas são diferentes e incomparáveis.

CAPÍTULO 2 – MODELO DE DECISÃO BASEADO NA FUNÇÃO UTILIDADE

No mundo de certezas, existe um consenso entre os pesquisadores que a escolha entre projetos independentes e mutuamente exclusivos deve ser feita através da maximização do VPL, ou seja, escolher o projeto para investir que maximiza a riqueza da empresa. Como visto no Capítulo 1, uma variável importante existente no mundo real é o risco associado com os resultados futuros. Este componente deve ser acoplado ao modelo de decisão, o que torna a avaliação e a seleção de um projeto pelo método VPL ineficiente.

No contexto atual, os objetivos das empresas não se resumem somente a maximização do valor esperado. Nas decisões que envolvem grandes montantes monetários, as variáveis tecnológicas, ambientais, recursos humanos, mercados, etc., tem um grau de importância significativo e não podem ser desconsideradas. Com a inclusão de novas variáveis, surgem os *tradeoffs* entre os atributos e os objetivos da empresa devem ser analisados cuidadosamente para modelar as preferências coerentemente.

2.1 MODELO DE DECISÃO UNIDIMENSIONAL

Para modelar uma decisão de forma adequada é necessário que o analista siga os passos apresentados na Seção 1.1. Na terceira etapa do processo da estruturação da análise de decisão, tem-se que determinar as preferências do tomador de decisão e o seu comportamento face ao risco.

Uma forma adequada de acoplar risco ao modelo de decisão é através da teoria da utilidade. A função utilidade pode ser definida empírica ou analiticamente (Seção 1.4). COZZOLINO (1977) propõe que a função exponencial como ferramenta para a análise do risco financeiro. O autor mostrou que a função exponencial é importante na avaliação e implementação da análise de risco nos projetos de exploração de petróleo (COZZOLINO, 1980). WALLS (1995) e WALLS & DYER (1996) consideram que a função utilidade mais usada na exploração de petróleo para representar o risco financeiro é a função exponencial do tipo:

$$u(x) = e^{-cx} \quad (2.1)$$

onde ,

$u(x)$ = utilidade do atributo no ponto x ,

x = valor da variável considerada (valor monetário),

c = índice de aversão ao risco.

O coeficiente de aversão ao risco é definido como: $c = -u''(x)/u'(x)$, onde $u'(x)$ e $u''(x)$ é a primeira e a segunda derivada da função utilidade, respectivamente. Este coeficiente fornece uma indicação do comportamento do investidor em relação ao risco com a variação da magnitude dos valores monetários(x) (NEPOMUCENO & SUSLICK, 2000). O valor de $c > 0$ implica em uma aversão ao risco, $c < 0$ implica em uma propensão ao risco e $c = 0$ implica em procedimento de neutralidade em relação ao risco.

O termo tolerância ao risco é definido como o inverso do coeficiente de aversão ao risco ($1 / c$) e é caracterizado como a soma de dinheiro na qual o tomador de decisão é indiferente para um investimento com 50% de chance de ganhar o valor investido e 50% de perder metade do valor investido (HOWARD, 1988).

Para exemplificar a definição de tolerância ao risco, considere a árvore de decisão (Figura 2.1) da seguinte loteria³ (adaptado de CLEMEN, 1990):

- Ganhar $\$Y$ com probabilidade 0.5
- Perder $\$Y/2$ com probabilidade 0.5

O tomador de decisão desejaria entrar neste jogo se Y fosse $\$100$ ou $\$2000$ ou $\$35.000$? Até que ponto o risco é tolerável?

³ O termo loteria pode ser entendido como uma ação ou evento, onde existe probabilidades de ganho e perda.

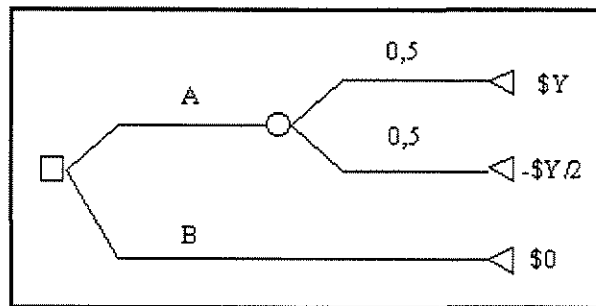


Figura 2.1 – Estimando a tolerância ao risco

O maior valor de Y pelo qual o tomador de decisão prefere entrar no jogo é aproximadamente igual a sua tolerância ao risco. Este é o valor que pode ser usado na função exponencial. Por exemplo, supondo que após ter considerado a árvore de decisão da Figura 2.1, o decisor conclui que o maior valor de Y que ele pretende continuar no jogo é \$900. Usando esta estimativa na função exponencial tem-se o resultado em “utilidade”:

$$u(x) = 1 - e^{-\frac{x}{900}}$$

Notar que esta função exponencial proporciona a transformação de valores monetários em utilidade.

Uma vez definida a tolerância ao risco do tomador de decisão e a função exponencial, é possível calcular facilmente o equivalente certo. Vamos supor o seguinte jogo:

- Ganhar \$2000 com probabilidade 0,4
- Ganhar \$1000 com probabilidade 0,4
- Ganhar \$500 com probabilidade 0,2

O valor de utilidade esperado é dado por:

$$\begin{aligned} \text{VEU} &= 0,4 \times U(\$2000) + 0,4 \times U(\$1000) + 0,2 \times U(\$500) \\ &= 0,4 \times (0,8916) + 0,4 \times (0,6708) + 0,2 \times (0,4262) \\ &= 0,7102 \end{aligned}$$

Para calcular o equivalente certo deste jogo basta igualar o VEU com a função exponencial.

$$0,7102 = 1 - e^{-\frac{x}{900}}$$

Após desenvolver a equação obtemos que o equivalente certo para este jogo e com tolerância ao risco de \$1114,71.

Em um estudo empírico de WALLS & DYER (1996), no qual foi utilizado um modelo de preferência, foi medido o coeficiente de aversão ao risco de 18 empresas do setor petrolífero no período de 1981 a 1990, descobrindo uma regra simples que relaciona a tolerância ao risco da firma com o seu nível de orçamento anual. Essa relação indica em uma primeira, que o valor de tolerância ao risco de uma firma é igual a 1/4 do seu orçamento anual de exploração. Para exemplificar, suponha que o orçamento anual de empresa para exploração de petróleo seja de 10 milhões. Neste caso a tolerância ao risco desta empresa seria igual aproximadamente igual a 2,5 milhões. Deve-se ressaltar que este valor é apenas uma estimativa inicial na avaliação do coeficiente de aversão ao risco de uma empresa individual. É fácil de visualizar que duas empresas com o mesmo orçamento destinado a exploração tenham diferentes coeficientes de aversão risco. Entre outros fatores podemos destacar: cultura gerencial, política de risco, fluxo de caixa, etc.

O modelo de decisão unidimensional pode ser aplicado tanto na aceitação quanto na seleção de projetos, ou seja, pode-se calcular a utilidade de um projeto e definir se será investido neste projeto baseado na mínima utilidade esperada do decisor. Por exemplo, suponha que para uma empresa a utilidade mínima para aceitar um projeto seja 0,85, ou seja, esta empresa só aceita investir em projetos com a utilidade maior que 0,85, caso contrário ela rejeita o projeto.

No caso da seleção de projetos, são oferecidos dois ou mais projetos para empresa decidir em qual investir. É avaliada a utilidade de cada projeto e comparadas entre si. O projeto com maior utilidade é o selecionado para o investimento. Usando este critério, o decisor está baseando-se no critério de maximização da utilidade esperada.

2.2 COMPARAÇÃO ENTRE OS PRINCIPAIS MÉTODOS DE DECISÃO (MAUT, AHP E MCDA)

A metodologia que acopla o risco e a incerteza no modelo de decisão com *tradeoffs* é denominada análise de decisão com múltiplos atributos. O campo da decisão com múltiplos critérios tem se expandido rapidamente nas últimas décadas. Novas metodologias e desenvolvimentos das existentes aparecem regularmente (BELTON, 1986). Entre estas metodologias podemos destacar o MAUT (Teoria de Utilidade Multiatributos), o AHP (Processo Hierárquico Analítico) e MCDA (Auxílio de Decisões com Múltiplos Critérios). Dentre estes métodos, escolhemos nesta dissertação o MAUT, que modela a decisão baseando-se na teoria de utilidade (ver Seção 1.3), considerando as preferências dos tomadores de decisão frente ao risco e avaliando o importância de cada atributo.

Devemos destacar que quando a decisão é baseada na teoria de utilidade, o objetivo passa a ser não mais maximizar o valor esperado e sim maximizar a utilidade esperada. Pode-se ressaltar que a teoria da utilidade padroniza todas as variáveis, isto é, transforma todas as variáveis em valores de utilidade podendo assim ser comparadas. Em outras palavras, o MAUT tem a capacidade de acoplar em um único modelo variáveis medidas em termos monetários ou não, baseando-se nas medidas de utilidade de cada variável.

Segundo EHRlich (1996), o MAUT foi a primeira das metodologias desenvolvida e devido ao seu rigor teórico que tornava o seu uso mais difícil para um analista menos preparado, enquanto o AHP é de utilização mais simples. A crítica ao AHP veio da escola europeia que criou uma série de métodos conhecidos pela abreviação comum MCDA.

Os métodos mais utilizados na atualidade são o MAUT e o AHP. Podem-se destacar alguns trabalhos que utilizam esses métodos na indústria do petróleo. RAY & MALLICK (1997) usam o AHP como modelo proposto para aquisição e gerenciamento de um sistema flutuante de produção de petróleo. Usando a mesma metodologia, DIAZ GALEANO (1998) aplica um processo sistemático para planejar e desenvolver uma campo de petróleo *offshore*. Exemplos de aplicações do MAUT foram apresentados na Seção 2.2 deste trabalho. No trabalho de NEPOMUCENO (1997) tem-se quatro aplicações do MAUT na área de exploração de petróleo.

O processo de tomada de decisão é muito complexo e para dificultar ainda mais é necessário decidir qual a metodologia mais adequada para aplicar no problema existente. Este tipo de dificuldade tem desafiado os pesquisadores, que fazem testes e comparações entre os métodos, tais como SCHOEMAKER & WAID (1982), BELTON (1986) e EHRLICH (1996).

De um modo geral, pode-se definir as três principais metodologias de decisão da seguinte forma:

- a primeira, chamada MAUT (Teoria de Utilidade Multiatributos), é baseada nas utilidades individuais de cada atributo, conforme salientado anteriormente. Através destas utilidades é possível quantificar e ordenar as preferências, além de agregar em único modelo as utilidades dos atributos, que comporta a importância de cada critério, além do seus *tradeoffs*. Com o MAUT é possível ordenar as alternativas de acordo com as preferências do tomador de decisão.
- a segunda, chamada AHP (Processo Hierárquico Analítico), inicia o processo pela decomposição hierárquica do objetivo geral do tomador de decisão, sendo estes, por sua vez, decompostos a se obter uma cascata em vários níveis, até que se atinja o patamar mais elementar de cada ramo. Com esta decomposição é possível comparar as alternativas ao nível mais elementar do objetivo global. Para cada critério, é estabelecido uma escala de preferência subjetiva em cada par de alternativas (1,2,3,5,7,9, e valores intermediários, onde 1 é a indiferença e 9 a preferência extrema). São calculados os autovetores resultando nos pesos relativos de preferência de cada sequência de comparações. Em cada nível os critérios também são comparados aos pares, num processo semelhante ao anterior, para especificar suas preferências relativas. Para cada alternativa, resulta uma soma ponderada dos pesos de preferência em cada critério, multiplicados pelos seus pesos.
- e a terceira é denominada MCDA (Auxílio de Decisões com Múltiplos Critérios). O processo de decomposição semelhante ao do AHP, onde as comparações também são feitas no último nível de decomposição e aos pares, mas o resultado é

binário em cada critério, não utilizando uma escala de preferência. A análise sobre o conjunto dos critérios conduz a uma desclassificação da alternativa menos preferida ou a promoção de classe da alternativa ganhadora. O próximo passo é a construção de classes e a ordenação de alternativas em cada uma delas.

O MAUT é o único processo que se propõe a analisar e quantificar o difícil problema da interação entre os atributos (EHRlich, 1996) através do modelo aditivo ou multiplicativo. Já o AHP, procura a simplicidade na modelagem do processo de decisão, de modo a permitir uma total compreensão do decisor, cativar sua confiança e a propiciar uma maior participação na estruturação do problema. Segundo EHRlich (1996), a grande desvantagem do método AHP reside nos compromissos com o rigorismo teórico devido a quantidade de etapas a serem cumpridas para o sucesso do processo. As classificações das alternativas é sempre feita por meio de uma função aditiva. O MCDA também parte do fim de um processo de decomposição hierárquica e as preferências dos critérios são estabelecidas por um pseudo-critério (assim chamado para acomodar relações fortes e relações fracas). Como no MAUT e no AHP, o intuito do MCDA é conduzir à escolha de uma ação vencedora, além de ajudar o decisor a entender melhor o problema de decisão.

Os dois métodos mais conhecidos e freqüentemente utilizados são o MAUT e o AHP (BELTON, 1986). Em geral, tomadores de decisão estão igualmente satisfeitos com ambos os métodos, embora exista um pensamento que o MAUT é mais transparente e de fácil entendimento. A principal desvantagem do MAUT é o seu insucesso para incorporar testes sistemáticos nas consistência de seus julgamentos. Em relação ao AHP, as desvantagens residem nos questionamentos ambíguos sobre os pesos dos atributos e a forte suposição da escala de proporção para a medida das classificações.

2.3 MODELO DE DECISÃO DE UTILIDADE COM MÚLTIPLOS ATRIBUTOS (MAUT)

Segundo CLEMEN (1990), a razão básica de usar a função de utilidade como um modelo de preferência na tomada de decisão é para capturar as atitudes em relação ao risco

e os retornos que podem ser obtidos. Obter altos retornos e diminuir a exposição aos riscos são dois objetivos conflitantes (*tradeoff*).

A teoria de utilidade com múltiplos atributos, por definição envolve uma tomada de decisão que escolhe uma entre um número de alternativas baseadas em dois ou mais critérios (NEPOMUCENO & SUSLICK, 2000). As alternativas envolvem risco e incerteza e podem requerer uma sequência de ações em diferentes períodos. O tomador de decisão decide no sentido de maximizar a utilidade esperada que depende dos critérios ou dos atributos. O MAUT adota uma larga teoria matemática e uma extensa escala de técnicas de avaliações práticas que juntas auxiliam no problema de decisão de classificar alternativas, fazer escolhas, ou por outro lado clarear a situação para o tomador de decisão (WALLS, 1995).

Pode-se destacar algumas aplicações do MAUT. CASEY (1994) aplicou esta teoria no desenvolvimento de uma mina de ouro. Já KEENEY (1980) aplica na seleção do melhor lugar para a construção de uma termelétrica de carvão. WALLS (1995) aplica o MAUT em processo de estratégia de negócios e na alocação de capital. Um ferramenta para aprimorar as qualidades de decisões de investimento para a exploração de petróleo usando o MAUT é proposto por NEPOMUCENO *et. al.* (2000). CASTRO & FURTADO (1998) aplicam o MAUT na decisão de escolher qual plataforma de petróleo é mais eficiente para produzir numa bacia com características específicas.

2.3.1- CONCEITOS IMPORTANTES PARA A FORMULAÇÃO DO MAUT

Segundo CLEMEN (1990), quando uma decisão é baseada no MAUT, é preciso considerar a interação entre os atributos de uma forma mais geral. Para avaliar esta interação considere a superfície de utilidade (Figura 2.2) para dois atributos. Embora seja possível pensar sobre vários atributos ao mesmo tempo, aqui será usado somente dois atributos para caracterizar a teoria de utilidade com múltiplos atributos. As idéias aplicadas em dois atributos são facilmente estendidas para três ou mais atributos.

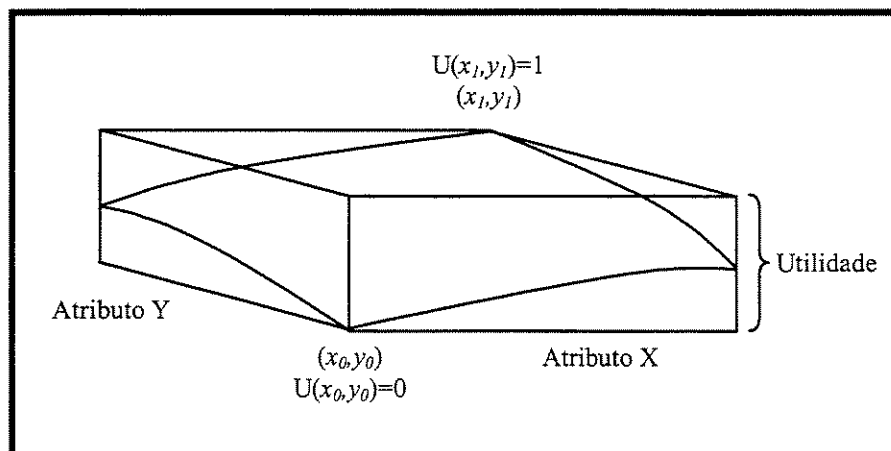


Figura 2.2 – Superfície de utilidade para dois atributos

A representação matemática geral da superfície de utilidade da Figura 2.2 é dada por:

$$U(x,y) = f \{ U_x(x), U_y(y) \}$$

A notação $f \{ \cdot, \cdot \}$ significa que $U(x,y)$ é uma função das utilidades individuais de $U_x(x)$ e de $U_y(y)$. Claro que se precisa de uma forma funcional específica, assim é considerado uma função linear dada por:

$$U(x,y) = c_1 + c_2 U_x(x) + c_3 U_y(y) + c_4 U_x(x) U_y(y) \quad (2.2)$$

A importância desta formulação é que ela facilita muito a avaliação da função utilidade com múltiplos atributos; necessita-se apenas das funções individuais e informações para colocá-las juntas. Essa maneira algumas vezes é chamada de “separabilidade”, ou seja, a função utilidade total pode ser “separada” em pedaços que represente diferentes atributos.

2.3.1.1 Independência Preferencial

Este tipo de arranjo requer que algumas considerações para função utilidade combinada. Essas condições dizem respeito sobre a maneira em que as preferências interagem entre os atributos. Uma condição necessário para que se tenha esse tipo de separabilidade é o atendimento da preferência condicional. Um atributo Y é considerado

preferencialmente independente de X se preferências para resultados específicos de Y não dependem do nível do atributo Y. Por exemplo, considere Y o prazo de realização de um projeto e X o seu custo. Se for preferível um prazo de 5 dias a um de 10 dias, assumindo que o custo é 100 em cada caso, e se também for preferível um prazo de projeto de 5 dias ao de 10 dias com custo de 200, então Y é preferencialmente independente de X, pois não importa o custo, sempre será preferível o menor prazo de realização.

Observa-se a necessidade de mútua independência preferencial, dessa maneira é também necessário que o custo seja preferencialmente independente do tempo de realização. Preferindo-se menos custo, não importando qual o prazo de realização, então X é preferencialmente independente de Y. Pode-se assim dizer que os dois atributos são mútua e preferencialmente independentes.

2.3.1.2 Independência de Utilidades

Outro conceito importante que deve ser destacado é o de mútua independência de utilidades. A independência de utilidade é uma propriedade mais forte do que a independência preferencial. Um atributo Y é considerado utilidade independente do atributo X se preferências para escolhas incertas envolvendo diferentes níveis de Y forem independentes dos valores de X. Por exemplo, pode-se imaginar a avaliação de um equivalente certo para uma loteria envolvendo somente saídas em Y. Se o valor de equivalente certo para a loteria Y é o mesmo, não importando qual o nível de X, então Y é utilidade independente de X. Se X também é utilidade independente de Y, então os dois atributos são mutuamente utilidades independentes.

Independência de utilidades, claramente, é análoga à independência preferencial, exceto que a avaliação é feita sob condições de incerteza. Para a avaliação do projeto do exemplo acima, admitindo-se que o equivalente certo para uma opção dada, diga-se, uma chance de 50% de Y=5 e uma chance de 50% de Y=10, não depende do nível no qual o custo X é fixado. Como as preferências para a loteria no atributo prazo são as mesmas (medidas pelos seus equivalentes certos) sem importar o nível fixado de custo, então o prazo é utilidade independente do custo.

Para determinar se as preferências são preferencialmente independentes, KEENEY & RAIFFA (1976) apresentam um procedimento para determinar se existe independência de utilidade. CLEMEN (1990) reapresenta este mesmo procedimento em seu livro.

Nem sempre é possível garantir que exista a mútua independência de utilidade em todos os casos, porém esta é uma aproximação usualmente adotada em trabalhos práticos de estudos de funções com múltiplos atributos.

2.3.1.3 Usando a Independência

Se a preferência do tomador de decisão mostra uma utilidade independência, então uma função de utilidade com dois atributos pode ser escrita como uma decomposição das funções de utilidade individuais. Como visto na Figura 2.2, o pior resultado (x_0, y_0) tem utilidade igual a 0, e o melhor resultado (x_1, y_1) tem utilidade igual a 1.

Considerando a mútua utilidade independência, a função de utilidade com dois atributos pode ser escrita da seguinte forma:

$$U(x,y) = k_x U_x(x) + k_y U_y(y) + (1 - k_x - k_y) U_x(x) U_y(y) \quad (2.3)$$

onde:

condição 1: $U_x(x)$ é função de utilidade de X tal que $U_x(x_0)=0$ e $U_x(x_1)=1$;

condição 2: $U_y(y)$ é função de utilidade de Y tal que $U_y(y_0)=0$ e $U_y(y_1)=1$;

condição 3: $k_x = U(x_1, y_0)$;

condição 4: $k_y = U(x_0, y_1)$.

O termo produto $U_x(x)U_y(y)$ nesta função de utilidade é o que permite o modelamento das interações entre os atributos. As funções U_x e U_y são as utilidades individuais e devem ser avaliadas com o outro atributo fixado para um nível particular (por exemplo, na avaliação de U_y , imagine que X está fixado para um nível específico). Para entender as condições 3 e 4, devem-se aplicar as utilidades individuais dentro da equação. Por exemplo:

$$U(x_1, y_0) = k_x U_x(x_1) + k_y U_y(y_0) + (1 - k_x - k_y) U_x(x_1) U_y(y_0)$$

$$= k_x(1) + k_y(0) + (1 - k_x - k_y)(1)(0)$$

$$= k_x$$

Pode-se observar que a importância relativa dos atributos é modelada pelas constantes escalares k_x e k_y . Estas constantes também são conhecidas como pesos do modelo com múltiplos atributos.

2.3.1.4 Atributos Substitutos e Complementares

Para completar os principais conceitos sobre o MAUT, falta definir o que são atributos substitutos e complementares. Na função de utilidade com múltiplos atributos, a interação entre os atributos é capturada pelo termo $(1 - k_x - k_y) U_x(x) U_y(y)$. Para interpretar este resultado, KEENEY & RAIFFA (1976) apresentam uma interessante interpretação do coeficiente $(1 - k_x - k_y)$. O sinal de $(1 - k_x - k_y)$ pode ser interpretado em termos da condição se x e y são complementos ou substitutos um do outro. Supõe-se que $(1 - k_x - k_y)$ é positivo. Agora examina-se a função utilidade com múltiplos atributos (Equação 2.3). Se valores preferidos de X e Y resultam altos valores para a função de utilidade condicional, o coeficiente $(1 - k_x - k_y)$ positivo conduzirá a utilidade total para o mesmo par mais alto. Então, se $(1 - k_x - k_y)$ é positivo, os dois atributos complementam-se um ao outro. Por outro lado, se $(1 - k_x - k_y)$ é negativo, altos valores em cada escala resultarão em um termo produto alto, que deve ser subtraído do valor de preferência múltiplos atributos. Nesse sentido, valores preferidos de cada atributo trabalham um contra o outro. Mas se um atributo é alto e o outro baixo, o efeito da subtração não é tão forte. Então, se $(1 - k_x - k_y)$ é negativo, os dois atributos são substitutos.

KEENEY & RAIFFA (1976) apresentam dois exemplos dessa relação entre x e y . No primeiro, imagina-se uma corporação com duas divisões que operam em diferentes mercados, deixando-se o lucro em cada divisão representar os dois atributos que importam para o presidente. De um modo geral, sucesso pelas duas divisões podem ser vistos como substitutos. Isto é, se um ganho de uma divisão for baixo e da outra alto, a firma continuará bem. Sucesso financeiro por uma divisão comumente garantirá o sucesso da firma.

Como um exemplo de casos de atributos complementares, os autores consideram o problema de um general encarando uma batalha sendo disputada em duas frentes. As conseqüências sobre as duas frentes representam dois atributos distintos, então esses dois atributos podem ser complementares. Isto é, derrota em uma frente pode ser quase tão ruim como derrota em ambas as frentes, e um sucesso completo só poderia ser garantido pela vitória em ambas as frentes.

2.3.1.5 O Problema do Banco de Sangue

Um exemplo para ilustrar o MAUT desde avaliação da função utilidade até a sua aplicação foi escrito por KEENEY & RAIFFA (1976) e reapresentado por CLEMEN (1990). Este exemplo também pode ser encontrado em NEPOMUCENO (1997). Aqui será apresentado somente o enunciado do problema, pois trata-se de um exemplo clássico. Maiores detalhes sobre o desenvolvimento do exemplo deve-se consultar as referências acima mencionadas.

O problema trata de uma pessoa envolvida com o controle do inventário do banco de sangue de um hospital. O espaço conseqüência contempla dois atributos: (1) falta de sangue e (2) descarte do sangue motivado pelo vencimento do prazo de validade.

No banco de sangue de um hospital, é importante uma política para decisão de quanto de cada tipo de sangue deverá existir no estoque. Para um determinado ano, várias políticas operacionais foram avaliadas em termos de falta de sangue e de quantidade de sangue descartado devido ao vencimento do prazo de validade.

A falta é caracterizada quando um sangue requerido por um médico não pode ser atendido pelo estoque do banco do hospital. Nessa situação, coloca-se uma ordem especial para o tipo particular de sangue para o banco de sangue central. Doadores profissionais poderão ser chamados, uma operação pode ser adiada e assim por diante, mas somente em circunstâncias extremamente raras haverá uma morte por falta de sangue. Sangue vencido é o sangue não usado durante seu tempo de vida legal que, habitualmente, é de 21 dias em muitos hospitais.

Naturalmente, guardar uma grande quantidade de sangue em estoque significa que a falta seria menos comum. Mas existe também um prazo de vencimento de sangue guardado na prateleira, além do qual ele deve ser descartado. Embora ter uma grande quantidade de sangue em mãos signifique uma baixa taxa de escassez, provavelmente também signifique uma alta taxa de vencimento (sangue para descarte). Claro, as saídas eventuais são desconhecidas por que é impossível prever exatamente quanto sangue será demandado. Deveria o hospital tentar guardar em estoque, tanto sangue quanto o possível a fim de evitar faltas? Ou deveria o hospital manter um estoque baixo para minimizar a quantidade de sangue vencido para descarte? Como deveria o banco de sangue do hospital balancear esses dois objetivos?

A saída do banco de sangue depende de uma demanda incerta ao longo do ano tão bem como da política do inventário específico escolhido (nível de estoque). Pode-se imaginar cada política de inventário como uma loteria sobre saídas incertas, tendo dois atributos: falta e vencimento. A falta é medida como uma porcentagem anual de unidades demandadas mas que não estavam em estoque, enquanto vencimento é a porcentagem de unidades descartadas devido ao vencimento de prazo. Um alto nível de estoque, provavelmente conduzirá à menor falta, porém a um descarte maior e, um baixo nível de estoque conduzirá à maior falta e menos descarte. Para escolher um nível de estoque apropriado, devem-se avaliar ambas as distribuições probabilísticas sobre resultados de falta e de descarte para cada nível possível de estoque e a função utilidade para o tomador de decisão sobre esses resultados. Como cada resultado tem dois atributos, necessita-se da função de utilidade com dois atributos que será apresentado nos itens seguintes.

2.3.2 – MÉTODOS DE ASSOCIAÇÃO DOS ATRIBUTOS

Os dois métodos predominantes de associação das alternativas para o MAUT são as formas aditiva e multiplicativa (KEENEY & RAIFFA, 1976). Quando os atributos do modelo possuem a mútua independência utiliza-se a forma aditiva. Se a mútua independência não é satisfeita, a forma multiplicativa deve ser utilizada para agregar as funções utilidades de cada atributo. A forma geral do modelo aditivo é:

$$u(x) = \sum_{i=1}^n k_i u_i(x_i) \quad (2.4)$$

onde x_i é o valor do atributo i ; $u_i(.)$ é o valor da utilidade do atributo i ; $0 \leq k_i \leq 1$ são as constantes escalares (pesos) para os n atributos tal que $\sum_{i=1}^n k_i = 1$.

Caso a mútua independência entre os atributos não seja satisfeita o modelo multiplicativo é dado por:

$$1 + ku(x) = \prod_{i=1}^n [1 + k k_i u_i(x_i)] \quad (2.5)$$

onde x_i e $u_i(.)$ são definidos como no caso aditivo; $0 \leq k_i \leq 1$ são as constantes escalares (pesos) para os n atributos tal que $\sum_{i=1}^n k_i \neq 1$; e k , conhecida como constante comum, é uma

constante escalar adicional definida como $1 + k = \prod_{i=1}^n [1 + k k_i]$ (veja KEENEY & RAIFFA,

1976). O modelo aditivo é um caso especial da forma multiplicativa onde $\sum_{i=1}^n k_i = 1$.

Para decidir qual forma utilizar dessas duas formas é apropriada para a quantificação da função real, KEENEY & RAIFFA (1976) mostram que a forma aditiva aplica-se quando

$\sum_{i=1}^n k_i = 1$, e que a forma multiplicativa aplica-se nos outros casos. O procedimento, então, é

avaliar a constante escalar k_i e somá-la até determinar a forma apropriada.

2.4 ESTIMATIVA DOS PESOS DOS ATRIBUTOS E ANÁLISE DE SENSIBILIDADE

Uma das primeiras tarefas do MAUT é atribuir pesos para os objetivos da empresa e como estes devem ser agregados no modelo. Os pesos do modelo com múltiplos objetivos mede a importância de pior para melhor entre os atributos do mesmo. Portanto, por se tratar do comportamento do modelo, esta atribuição de pesos tem que ser cuidadosa e deve

representar de forma fiel as preferências da empresa em relação aos seus principais objetivos.

A literatura apresenta alguns métodos para determinar os pesos do modelo. CLEMEN (1990) apresenta três métodos para ponderar os atributos: precificação, troca de pesos e pesos lotéricos. Segundo o autor estes três métodos apresentam resultados sofisticados. Se os atributos são facilmente reduzidos à dólar, então o método da precificação pode ser usado facilmente. Troca de pesos é uma metodologia um pouco mais exigente, mas uma vez que o analista adquire habilidade com o método, a estimação torna-se relativamente fácil. Finalmente, o método pesos lotéricos é o mais exigente e o único que incorpora a atitude de risco do tomador de decisão de uma forma sistemática.

Pode-se destacar outros trabalhos para a estimação dos pesos: KIRKWOOD & SARIN (1985) propõem a classificação das alternativas através da informação parcial dos pesos. Por exemplo, o tomador de decisão pode ser incapaz de responder uma série de perguntas sobre *tradeoff*, mas pode classificar os atributos em função de sua magnitude; BAIRD (1986) apresenta um método subjetivo para estimação dos pesos, utilizando-se de perguntas sobre as preferências do tomador de decisão, ou seja, através de um método empírico, o analista tem condição de estimar a importância de cada atributo no modelo; SOLYMOSI & DOMBI (1986) propõem um método iterativo para a estimação dos pesos denominado centroide que foi originalmente desenvolvido para estimar os pesos de um modelo com múltiplos critérios de n dimensões.

Para avaliar se os métodos de estimação dos pesos são controversos, SCHOEMAKER & WAID (1982) propõe uma comparação experimental entre cinco métodos para estimação dos pesos. Infelizmente este estudo experimental revelou que existem múltiplas fontes de inconsistência.

A determinação dos pesos do modelo com múltiplos critérios envolve julgamento humano e a subjetividade está envolvida na especificação da função utilidade (BAIRD, 1989). Não é apropriado, portanto, criticar pesos estabelecidos por alguém como sendo errados. Os pesos podem freqüentemente variar de uma decisão para outra, com os critérios

assumindo maior ou menor importância de acordo com a atitude do gerente. Eles são raramente invariantes.

É importante perceber que a simples especificação da importância relativa (atribuição dos pesos) de dois atributos não basta, é necessário entender exatamente qual o significado exato dos pesos em termos de uma espécie de taxa de *tradeoff* entre os atributos.

Uma vez estimado os pesos, torna-se importante realizar uma análise de sensibilidade para verificar o comportamento dos mesmos. De um modo geral, as técnicas tipicamente usadas variam somente um único peso isoladamente conservando os outros constantes e observam o resultado no modelo. A existência de um método que varie todos os pesos de uma só vez torna-se muito útil. Este é um dos principais objetivos que buscamos nesta dissertação que será apresentado no próximo capítulo.

CAPÍTULO 3 – MÉTODOS DE ANÁLISE DE SENSIBILIDADE

A análise de sensibilidade é uma componente de grande importância no controle da qualidade nas decisões chaves e nos estados das variáveis. Usando o modelo de decisão com múltiplos critérios é fácil conduzir uma análise de sensibilidade nas incertezas de um projeto de exploração de petróleo variando as probabilidades de sucesso, os valores das reservas, o preço do produto, etc. Esta análise varia a natureza das incertezas em cada atributo dos projetos individuais, bem como o portfólio dos projetos. Mudanças nas características de risco podem afetar profundamente a análise da utilidade esperada e a classificação dos portfólios dos projetos (WALLS, 1995). Com respeito as variáveis chaves da decisão, as opções de interesse máximo e mínimo avaliadas para cada projeto são variados, permitindo uma análise das diferenças dos grupos das oportunidades ou portfólios de decisão, e a investigação dos efeitos em uma estratégia de investimento das opções de exploração.

A análise de sensibilidade também pode ser aplicada aos pesos dos atributos. Os pesos são ajustados para investigar o impacto de mudanças na importância dos objetivos estratégicos da empresa. O decisor pode observar os efeitos destas variações dos pesos nas mudanças dos portfólios mesclados. Para ignorar um atributo, basta atribuir zero ao peso referente a ele na função utilidade. Este processo de análise de sensibilidade é muito útil para o tomador de decisão entender os impactos dos objetivos e os valores de *tradeoffs* entre os atributos na avaliação da estratégia de investimento mais apropriada. A análise de sensibilidade nas funções de preferencias individuais, permite ao decisor examinar as implicações de diferentes julgamentos de valores de pessoa para pessoa dentro da empresa. Este processo proporciona uma idéia sobre possíveis diferentes resultados entre as tomadas de decisões individuais na companhia.

Após concluída a análise de sensibilidade, o analista tem condição de avaliar se existem consideráveis diferenças entre os resultados. Caso estas diferenças existam, deve-se avaliar e investigar as razões das mesmas. Em caso de inconsistência do modelo com as preferências do decisor, é necessário reformular o modelo até que os resultados tornem-se coerentes.

Existem algumas formas de análise de sensibilidade e a mais difundida e aplicada é o método unidimensional onde uma variável é alterada, mantendo as restantes constantes, em casos multivariados. Este método não é extremamente eficiente, pois ele não considera a interação entre as variáveis. Uma segunda metodologia que foi aplicada por BUTLER *et al.* (1997) em problema de decisão, consiste na variação de duas variáveis simultaneamente, o que de certa forma soluciona uma parte do problema unidimensional. Este método apresenta uma solução satisfatória em modelos com a até três variáveis, conseguindo capturar as interações entre as variáveis.

Sabemos que atualmente os problemas de decisão estão cada vez mais complexos e com um número cada vez maior de considerações que devem ser incorporadas. As empresas tem que se preocupar com variáveis do tipo ganho financeiro, mudanças tecnológicas, variação de preços, legislação ambiental, distância do mercado consumidor, imagem corporativa e outras, e os métodos de análise de sensibilidade (uni e bidimensional) não funcionam perfeitamente segundo os interesses do analista nestas condições. Outra preocupação do analista seria quantificar a importância e analisar a interação entre estas variáveis, onde os métodos tradicionais de avaliação não apresentam um desempenho adequado e eficiente.

Para superar estas dificuldades e proporcionar ao analista uma interação entre os pesos e um teste da robustez do modelo proposto, foi desenvolvida a análise de sensibilidade de dimensão elevada. Os primeiros trabalhos pertencem a BUTLER *et al.* (1997) aplicou este procedimento para quantificar os pesos e avaliar a consistência do modelo de decisão na escolha da melhor localização de uma termelétrica de carvão. A aplicação desta metodologia proporciona.

A proposta desta dissertação é aplicar a análise de sensibilidade de dimensão elevada na estimação dos pesos do modelo de decisão com múltiplos atributos. O objetivo principal é fornecer uma ferramenta sistemática que avalie os pesos, bem como teste a consistência do modelo de decisão.

Para caracterizar as duas modalidades de análise de sensibilidade (unidimensional e bidimensional) aplicadas aos problemas de decisão vamos considerar o seguinte exemplo

com três atributos. O gerente de uma empresa petrolífera tem que decidir se muda sua sede administrativa de lugar ou não. Caso a decisão seja mudar a sede, tem-se que decidir qual o melhor lugar entre três localidades (A, B, e C) para instalar a nova sede. Para simplificar este processo de decisão serão considerados somente três atributos (objetivos): *espaço*, *acesso* e *custo*. O atributo *espaço* diz respeito ao tamanho da nova sede, se ela vai acomodar melhor os funcionários e se a distribuição de salas se ajusta a necessidade da firma. O atributo *acesso* é caracterizado pela forma como clientes e funcionários chegarão na empresa, se o sistema de transporte da região da nova sede é eficiente e se a sede possui espaço para estacionamento de veículos. O terceiro atributo, *custo*, é medido através do capital que será gasto para adaptar a nova sede as necessidades da empresa e do valor gasto com a mudança.

Para obter os valores de utilidade para cada opção é feita uma entrevista com o gerente responsável pela decisão. O resultado desta entrevista está na Tabela 3.1, apresentando os valores de utilidade para cada opção e atributos.

Tabela 3.1 – Valores de utilidade para a escolha da sede da empresa

<i>AÇÃO</i>		<i>Espaço</i>	<i>Acesso</i>	<i>Custo</i>
Não mudar	A	0,33	0,55	1,00
	B	1,00	0,30	0,40
Mudar	B	0,88	0,71	0,47
	C	0,56	1,00	0,42

Na entrevista também se definiu qual a importância (pesos) de cada atributo. Na quantificação dos pesos foi considerado que os atributos eram mutuamente independentes, ou seja, o modelo de decisão com múltiplos atributos aplicado é o aditivo. O atributo custo é considerado o mais importante tendo uma importância relativa igual a 0,48. O atributo de

menor importância para a empresa é o acesso com 0,20 de importância relativa. Para o atributo espaço foi atribuído 0,32 de importância relativa, tal que os pesos somem 1.

Aplicando os valores de utilidade individuais no modelo com múltiplos atributos aditivo (Equação 2.4) obtém-se os seguintes resultados (Tabela 3.2):

Tabela 3.2 – Modelo de Utilidade Aditivo

<i>AÇÃO</i>		<i>Espaço</i>	<i>Acesso</i>	<i>Custo</i>	<i>Soma</i>
Não mudar		0,106	0,110	0,480	0,696
	A	0,320	0,060	0,192	0,572
Mudar	B	0,282	0,142	0,226	0,649
	C	0,179	0,200	0,202	0,581

Pela Tabela 3.2 verifica-se que a melhor opção é não mudar a sede de lugar com utilidade de 0,696. Ficando como segunda melhor opção mudar para local B (utilidade de 0,649). Nota-se que os valores de utilidade agregada de cada uma das opções não possuem uma variação muito grande, ou seja, a pior opção tem utilidade de 0,572 e a melhor 0,696, logo uma análise de sensibilidade deve ser aplicada para avaliar o comportamento dos pesos do modelo.

3.1 ANÁLISE DE SENSIBILIDADE UNIDIMENSIONAL

A análise de sensibilidade proporciona ao tomador de decisão avaliar o modelo conforme a variação dos pesos dos atributos. Uma alternativa para avaliação dos pesos deste modelo é a análise de sensibilidade unidimensional, variando-se os pesos de um atributo enquanto é mantida uma razão constante entre os demais pesos dos atributos, de modo a garantir que a somatória se mantenha sempre igual a 1. Este tipo de análise ignora o

potencial de interação que pode resultar quando manipula-se simultaneamente os múltiplos pesos dos atributos, podendo ocasionar erros na avaliação do modelo.

No exemplo da escolha do melhor local para instalar uma nova sede para a empresa, a análise de sensibilidade será aplicada nos pesos do modelo aditivo. Na Figura 3.1 tem-se a aplicação da análise unidimensional.

O traço vertical na Figura 3.1 indica os pesos estimados de cada atributo de acordo com a preferência da empresa. Cada opção tem um comportamento diferente em relação aos atributos. O atributo custo tem um grau de importância elevado na decisão, ou seja, quando o peso deste diminui, outros locais podem ser mais apropriados para a instalação da nova sede. Deve-se destacar que de acordo com a Figura 3.1, existe uma combinação ótima para cada opção, ou seja, todas as opções podem ser classificadas como sendo a melhor opção.

A grande falha deste método é a não verificação das interações entre os atributos. Por exemplo, a opção C tem um comportamento totalmente oposto entre os atributos custo e acesso não sendo medida pela análise de sensibilidade unidimensional. Esta técnica funciona muito bem quando a decisão depende somente de um atributo, mas quando o processo tem três ou mais atributos, a análise fica complicada e deficiente, pois o analista tem que avaliar as opções observando a variação de cada atributo isoladamente.

3.2 ANÁLISE DE SENSIBILIDADE BIDIMENSIONAL

Uma segunda alternativa é a combinação total dos pesos através de simulação algébrica (BUTLER *et al.*, 1996). Os resultados podem ser facilmente interpretados quando temos somente dois ou três atributos. Na Figura 3.2, os eixos x e y representam os pesos do espaço e acesso respectivamente. Isto implica que o peso do atributo custo é $1-x-y$. Para cada par (x, y), a melhor opção é indicado no gráfico da Figura 3.2. Quando se opera com três atributos, esta análise só é válida para o modelo aditivo, pois no caso multiplicativo, seria necessário avaliar a combinação dos pesos em um arranjo tridimensional, tornando mais complexa a sua visualização.

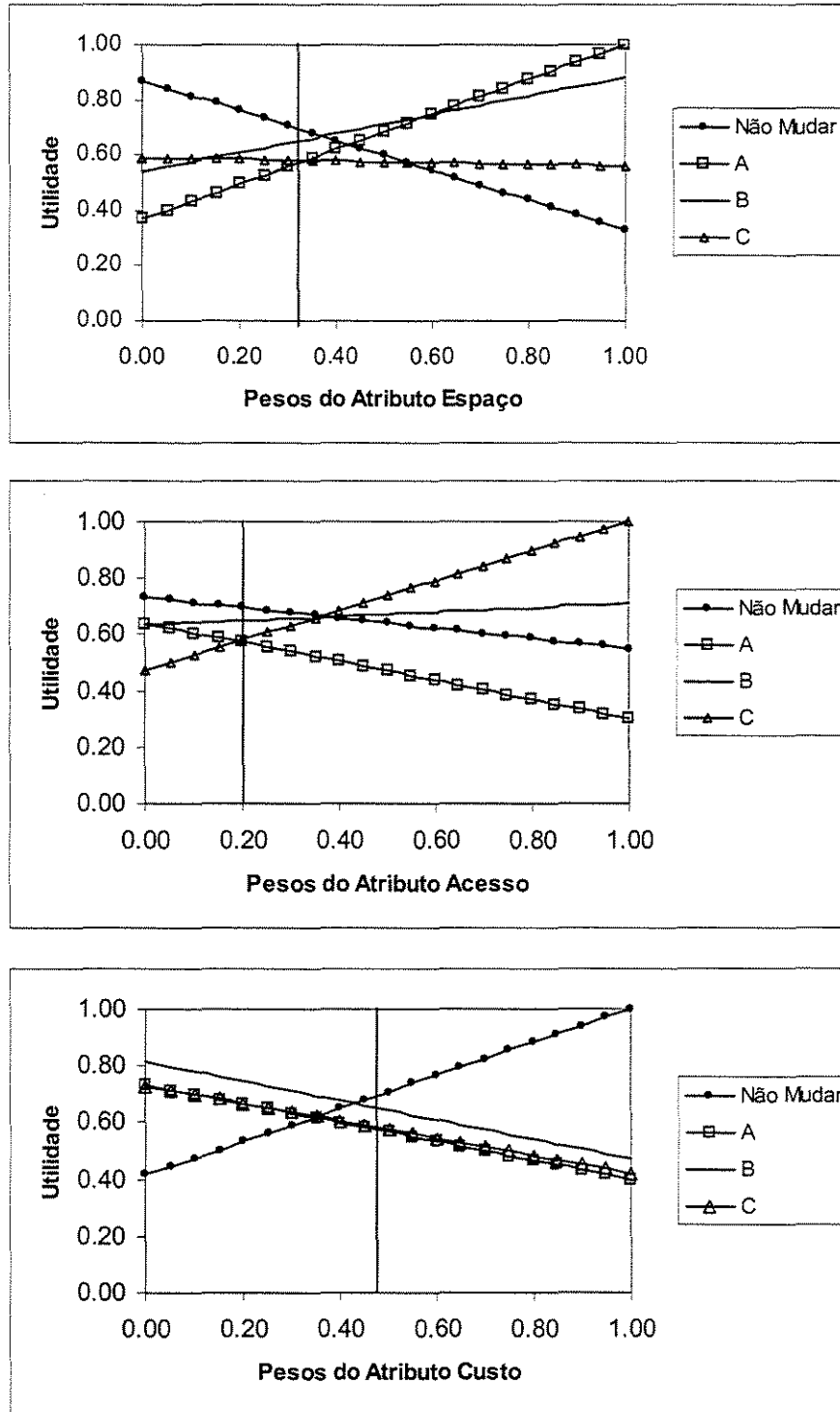


Figura 3.1 – Análise de sensibilidade unidimensional dos pesos do modelo de decisão

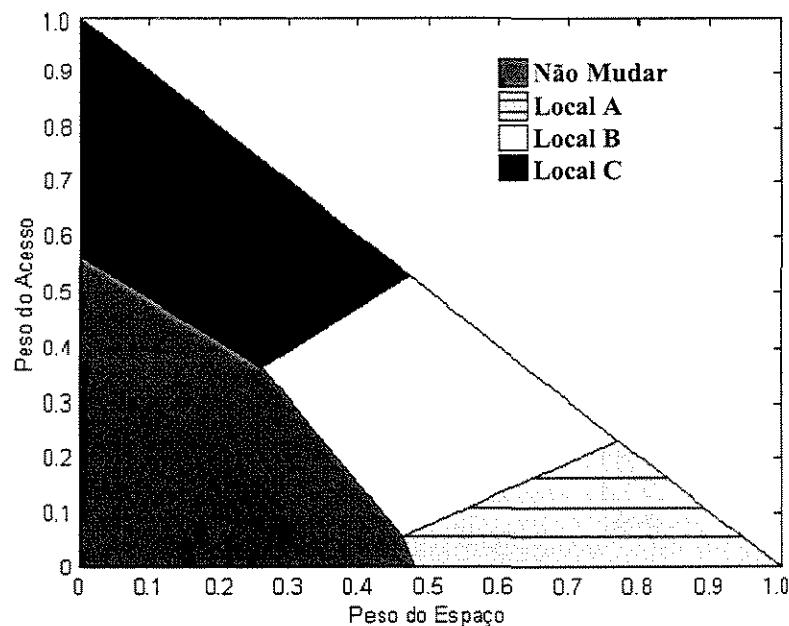


Figura 3.2 – Análise de sensibilidade bidimensional dos pesos do modelo de decisão

No exemplo da escolha do melhor local para a sede da empresa os pesos são 0,48, 0,20 e 0,32 para os atributos custo, acesso e espaço respectivamente. Com esta configuração, a melhor opção é a de não mudar a sede de lugar como visto na Figura 3.2, onde todas as configurações de pesos podem ser obtidas. Duas críticas podem ser feitas a esta metodologia: a suposição de mútua independência entre os atributos e o número de atributos que podem ser avaliados ao mesmo tempo.

Caso a suposição de mútua independência não seja satisfeita, o modelo multiplicativo deve ser ajustado para esta decisão, ou seja, a somatória dos pesos dos atributos não é igual a um. Neste caso, análise de sensibilidade bidimensional com a interação total entre os objetivos só é possível com dois atributos, pois a complexidade de visualização impede que o modelo tenha a variação dos pesos de três ou mais atributos.

A segunda crítica diz respeito ao número de atributos, inclusive quando a mútua independência entre os atributos existe. Neste caso o modelo de decisão aditivo é aplicado ao problema e os pesos dos atributos obrigatoriamente somam um. A análise de sensibilidade bidimensional neste caso só consegue medir eficientemente a interação entre

os objetivos, quando o número de atributos é no máximo igual a três. Caso o número de atributos seja quatro, a figura geométrica para analisar a interação entre os quatro atributos tem a forma de um tetraedro. Com um número maior de variáveis, a utilização deste tipo de metodologia torna-se ineficiente, pois só será possível variar três pesos ao mesmo tempo.

Outro inconveniente desta análise é o fato de que pode aparecer algumas opções onde nenhuma combinação de pesos satisfaça as preferências do analista. Este fato não significa que estas opções devam ser descartadas. É necessário fazer uma análise mais detalhada dos do problema e das preferências do decisor, pois esta possibilidade pode aparecer como uma segunda opção e ser mais viável para a empresa.

Caso a empresa tenha mais objetivos, o que é uma realidade no contexto atual da indústria do petróleo, torna-se muito complexo avaliar a qualidade e robustez do modelo. Esse obstáculo pode ser superado com o emprego da análise de sensibilidade de dimensão elevada, permitindo a empresa incluir a quantidade de objetivos desejados que satisfaçam as suas preferências.

Devemos ressaltar que quando temos até três atributos, a análise de sensibilidade bidimensional torna-se importante, principalmente quando o tomador de decisão não sabe avaliar os pesos e a hierarquização dos objetivos para a empresa. O gráfico da Figura 3.2 fornece uma visão geral do modelo, permitindo ao gerente ou ao grupo de pessoas responsáveis pelo processo decisório que tenham algumas indicações sobre as suas preferências.

3.3 ANÁLISE DE SENSIBILIDADE DE DIMENSÃO ELEVADA

O método de análise de sensibilidade de dimensão elevada proposto inicialmente por BUTLER *et al.* (1997) consiste em gerar os pesos dos atributos, utilizando um programa de simulação que gere várias combinações de pesos. Esta técnica proporciona um meio conveniente de testar a robustez do modelo de decisão.

Em seu trabalho, BUTLER et al. (1996), discute três classes de simulações: geração dos pesos aleatoriamente, pesos aleatórios preservando a importância entre os atributos e pesos aleatórios em função de uma distribuição hipotética.

3.3.1 – Pesos Aleatórios

Neste caso, os pesos para os atributos são gerados totalmente aleatórios. Este processo de simulação implica que o tomador de decisão não sabe qual a importância relativa dos objetivos, ou seja, o decisor desconhece a classificação dos atributos por ordem de importância. Em muitos cenários com múltiplos critérios, a classificação das alternativas limita de forma significativa o potencial de ordenação. É simples achar as alternativas dominantes e dominadas por inspeção; entretanto, relações sutis que determinam a dominância estrutural geralmente são mais complicadas de identificar. Usando a simulação de geração de pesos aleatórios pode ser possível descobrir estas relações de ordenação entre as alternativas.

O processo de obtenção destes pesos é bem simples, basta simular aleatoriamente estes pesos e atribuir para cada atributo, independente da importância de cada objetivo. A Figura 3.3 apresenta fluxograma de simulação dos pesos.

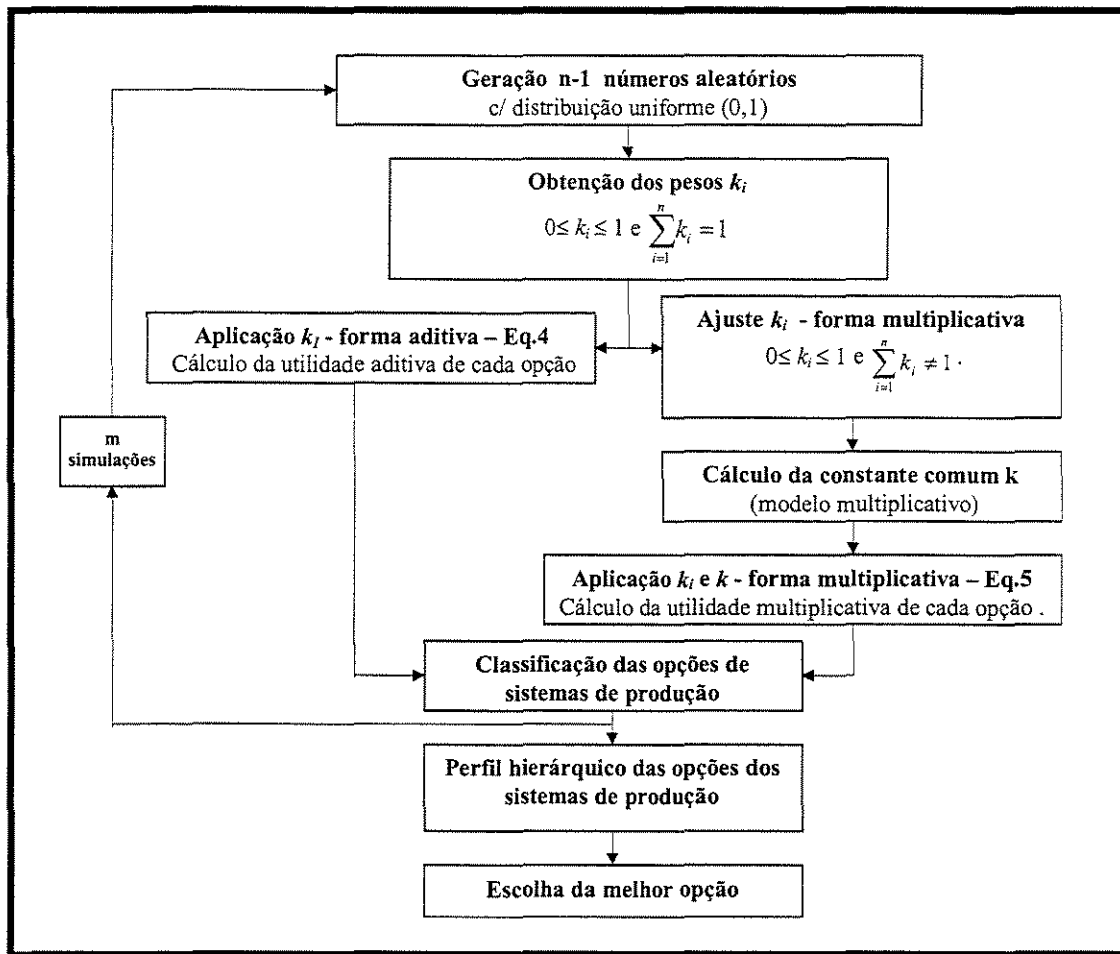


Figura 3.3 – Fluxograma das etapas utilizadas na simulação dos pesos na análise de sensibilidade de dimensão elevada

3.3.2 – Pesos Ordenados

O uso da simulação de pesos totalmente aleatórios ignora o julgamento em relação aos *tradeoffs* entre as medidas, a qual pode ser aplicada em situações onde alguns atributos são mais importantes que os outros. Por outro lado, a estimação exata dos pesos pode ser legitimamente contestável. Os números vinculados a estes pesos podem implicar uma exatidão que não é apropriada para a análise.

Enquanto a atribuição de um valor exato para os pesos pode ser questionada, uma ordem de importância relativa dos atributos pode ser bem menos controversa. A ordem de importância refere-se a ordenação dos atributos, onde o objetivo mais preferido pelo decisor é considerado como o melhor e o objetivo de menor importância o pior. Para obter

esta ordenação o processo é bem simples e possui um erro menor que a estimação numérica dos pesos.

O processo de simulação é semelhante ao aplicado ao método de pesos totalmente aleatórios, bastando apenas atribuir os pesos aos objetivos de acordo com a ordenação dos atributos conforme as preferências do decisor.

3.3.3 – Pesos com Distribuição

Este terceiro tipo de análise de sensibilidade através de simulação considera que o processo de estimação dos pesos está sujeito a variação segundo uma distribuição estatística. Para um simples tomador de decisão, esta variação pode ser em função dos erros associados com a estimação dos pesos. Em relação a um grupo de pessoas, diferentes opiniões e preferências dos decisores são responsáveis por esta variação. A idéia da análise de sensibilidade *high dimension*, é considerar a estimação dos pesos como resposta de uma possível distribuição.

Para explorar as implicações da variação de resposta, as estimações dos pesos são tratadas como médias de uma distribuição de probabilidade, e os pesos são gerados em função destas distribuições. Embora esta aproximação resultará na escolha dos pesos que são relativamente próximos (dependendo das suposições consideradas para definir a distribuição) dos pesos atuais, ela permite a violação da ordenação dos pesos estimados na sua seleção.

3.3.4 – Processo de simulação

O primeiro passo da simulação da análise de sensibilidade é gerar aleatoriamente $n-1$ grupos compostos de dois valores entre 0 e 1, uniformemente distribuídos e ordenados (Figura 3.3). Suponha que os números ordenados são: $1 > r_{(n-1)} \geq \dots \geq r_{(2)} \geq r_{(1)} > 0$. As primeiras diferenças destes números ordenados (incluindo os valores 0 e 1) podem ser obtidos como $k_n = 1 - r_{(n-1)}$, $k_{n-1} = r_{(n-1)} - r_{(n-2)}$, ... , $k_1 = r_{(1)} - 0$. Então, o conjunto de números (k_1, k_2, \dots, k_n)

somará um e ainda será uniformemente distribuído no possível domínio de pesos para o modelo aditivo (segundo passo na Figura 3.3).

No caso do modelo multiplicativo, os valores dos pesos variam entre 0 e 1. Assim, os pesos também podem ser gerados usando a distribuição uniforme (0,1). Uma vez gerado o conjunto de pesos, a constante comum k pode ser calculada para cada conjunto de pesos. Entretanto, esta aproximação não explora perfeitamente os possíveis valores de k na Equação 2.5. Em outras palavras, a maioria das constantes comuns serão menores do que

0, pois $E\left[\sum_{i=1}^n k_i\right] = \frac{n}{2}$, que é maior que 1 se $n > 2$.

Como alternativa, BUTLER et al. (1997) apresenta outra forma de gerar pesos aleatórios associados com o modelo multiplicativo. Esta aproximação gera aleatoriamente a soma de parâmetros escalares, e aleatoriamente divide este intervalo dentro de escalas individuais constantes. Esta mudança na metodologia é necessária para garantir que $0 < k_i < 1$ para qualquer i , e para explorar todas as possibilidades da constante comum k . este método pode ser resumido como:

Etapa 1: gerar n pesos aleatórios como no caso aditivo, isto é, $0 < k_i < 1$ para qualquer i

$$\text{e } \sum_{i=1}^n k_i = 1;$$

Etapa 2: gerar um número aleatório c no intervalo (0,1)

gerar um número aleatório s_1 no intervalo (0,1)

gerar um número aleatório s_2 no intervalo (1, n)

Etapa 3: se $c < 0.5$, $k_i^* = s_1 k_i$

$$\text{senão } k_i^* = k_i + [(s_2 - 1)(1 - k_i)] / \sum_{j=1}^n (1 - k_j)$$

onde k_i^* é o peso associado ao atributo i no modelo multiplicativo

Etapa 4⁴: calcular a constante comum k tal que $1 + k = \prod_{i=1}^n [1 + k k_i^*]$.

Dessa forma, teremos m valores de utilidade para cada uma das opções. Esses valores são ordenados e classificados na escala de um até o número de opções, obtendo-se uma matriz de dados passível de tratamento estatístico (Figura 3.3). A robusteza do modelo e a escolha da opção mais eficiente é obtida no perfil hierárquico de cada opção através das matrizes resultantes da simulação.

⁴ O cálculo da constante comum k é feito segundo KEENEY & RAIFFA (1976).

CAPÍTULO 4 – APLICAÇÃO DA ANÁLISE DE SENSIBILIDADE DE DIMENSÃO ELEVADA NAS ATIVIDADES DE E&P NA INDÚSTRIA DO PETRÓLEO

4.1 – ESTUDO DE CASO 1 – APLICAÇÃO DA ANÁLISE DE SENSIBILIDADE DE DIMENSÃO ELEVADA NA ESCOLHA DO MELHOR PROSPECTO DE EXPLORAÇÃO DE PETRÓLEO *OFFSHORE*

O primeiro estudo de caso será baseado no trabalho desenvolvido por NEPOMUCENO *et al.* (2000) apresentando uma ferramenta que incrementa a qualidade da decisão para a exploração de petróleo, incluindo os objetivos financeiro e tecnológico da empresa. Neste estudo o MAUT é utilizado para combinar o ganho das mudanças tecnológicas dentro do investimento de capital das empresas nos processos de exploração e produção de petróleo (E&P). Os autores definem qual deve ser a participação das empresas em projetos de exploração *offshore* em três bacias brasileiras.

As mudanças nas tendências que vem ocorrendo no setor de exploração e produção de petróleo nas últimas décadas, tem criado novas oportunidades através do corte de custos e da revitalização da indústria. Significativos avanços tem ocorrido na tecnologia *upstream*, particularmente nos testes e nas análises dos campos, com os métodos de sísmica 3D e a melhor visualização do comportamento dos reservatórios. A taxa de sucesso dos furos experimentais dos poços tiveram um aumento radical, incluindo novas técnicas de perfuração, as quais aumentaram as taxas de descobertas. As tecnologias de produção flutuante reduziram o tempo de desenvolvimento dos campos. Todos estes ganhos tecnológicos tem se refletido no descobrimento de novos campos e na redução de seu custo nesta década (NEPOMUCENO *et al.*, 2000).

Segundo estes autores, este cenário cria novos determinantes na alocação de capital entre um grupo de projetos caracterizados pelo alto grau de tecnologia contido, pelo risco e pela incerteza. Apesar de sua importância na adição de reservas, no aumento da produção de hidrocarbonatos e na redução de custos, os valores tecnológicos frequentemente não são medidos e incorporados no processo de análise de risco. Algumas empresas analisam a tecnologia como um custo e não como um investimento que gerará um bom retorno.

De acordo com WALLS (1995), um passo fundamental na construção do MAUT é o desenvolvimento de uma estratégia de negócios, concentrada nos objetivos que são importantes para o sucesso da empresa. Os objetivos têm que ser definidos claramente, pois são essenciais para o relacionamento de tarefas complexas e interação de múltiplos objetivos na tomada de decisão na exploração de petróleo.

No modelo proposto por NEPOMUCENO *et al.* (2000), os objetivos da empresa são divididos em dois: maximização do capital, medido pelo VPL e maximização do ganho tecnológico em E&P de petróleo. Com os objetivos definidos, a empresa tem que decidir em qual projeto deve alocar seu capital de acordo com a taxa de partição em cada um.

Neste caso, foram utilizado dois atributos (financeiro e tecnológico) para definir qual prospecto de exploração de petróleo fornece o melhor retorno financeiro de acordo com o montante capital que a empresa dispõe para investimento. O modelo decisão utilizado foi o aditivo (Equação 2.4) e os pesos dos atributos foram definidos empiricamente. Neste novo estudo, será aplicada a análise de sensibilidade de bidimensional e de dimensão elevada tanto para o modelo aditivo como para o multiplicativo (Equação 2.5), além disso, um terceiro atributo será incorporado no modelo, conforme apresentado por FURTADO & SUSLICK (2000).

Primeiramente é feita análise financeira de cada um dos prospectos. Na Tabela 4.1 é apresentado o resumo da avaliação econômica dos prospectos.

Tabela 4.1 – Resumo da avaliação econômica dos prospectos de exploração de petróleo.

Prospecto	Capital de Risco	VPL	Reserva	Probabilidade de Sucesso
	MMUS\$	MMUS\$	MMBBL	(%)
A	60,08	153,80	300	33
B	232,46	448,30	300	50
C	95,16	363,20	300	25

Baseando-se no comportamento das empresas, a função utilidade mais usada na exploração de petróleo para representar o risco financeiro é uma função exponencial do tipo:

$$u(x) = e^{-cx} \quad (4.1)$$

onde ,

$u(x)$ = utilidade do atributo no ponto x ,

x = valor da variável considerada (valor monetário - VPL),

c = índice de aversão ao risco.

Para construir a curva de utilidade do risco financeiro basta atribuir 1 para o maior valor de VPL (neste caso igual a 500 MMUS\$) e zero para o pior (-300 MMUS\$). Os valores intermediários são obtidos por interpolação. Na Figura 4.1 tem-se o ajuste da curva de utilidade para dois valores de tolerância ao risco.

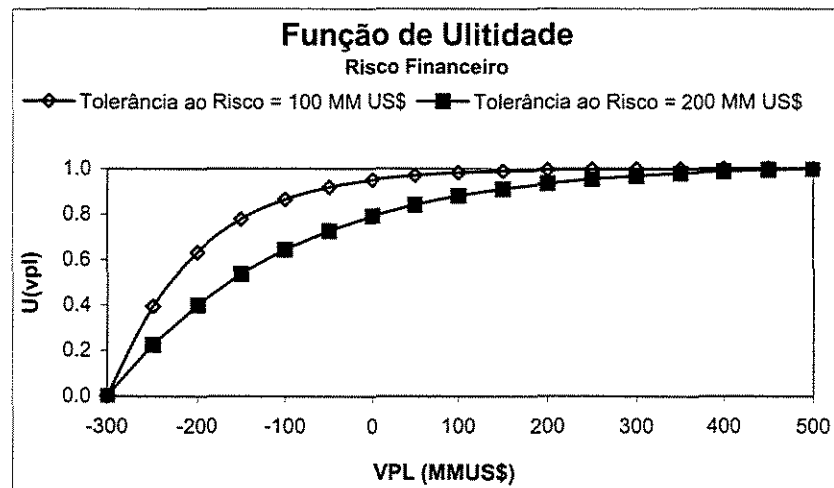


Figura 4.1 – Curva de utilidade do atributo financeiro (exploração)

Por ser tratar de prospectos *offshore*, o atributo ganho tecnológico foi medido através da lâmina d'água e da profundidade do reservatório, ou seja, quanto maior a lâmina d'água e a profundidade do reservatório, maior será o ganho tecnológico da empresa. Esta situação possui um *tradeoff*, pois quanto maior a lâmina d'água, menor a profundidade do reservatório.

Na Tabela 4.2 é apresentado o resumo do ganho tecnológico dos três prospectos.

Tabela 4.2 – Resumo das características do reservatório dos prospectos de exploração de petróleo

Prospecto	Lâmina D'água	Reservatório	Probabilidade de Ocorrência
	metros	metros	(%)
A	1200	5500	100
B	1600	3500	100
C	1000	4300	100

Para o atributo *risco tecnológico* é possível encontrar alguns estudos onde foram adotados como função utilidade o modelo logístico, que é dado por:

$$u(x) = \frac{1}{a - be^{-cx}} \quad (4.2)$$

onde:

a e b = constantes do modelo,

c = coeficiente de aversão ao risco,

u(x)= utilidade do atributo no ponto x,

x = variável de interesse (ganho tecnológico).

Segundo LANFORD (1972), esta função apresenta uma curva do tipo S, com uma sucessão de diferentes tecnologias que aparecem em um certo período com intuito de atender uma determinada demanda. OLIGNEY & ECONOMIDES (1998) usam a curva logística para ajustar uma curva tecnológica para a produção de petróleo. Essa sequência de tecnologias apresenta um comportamento segundo uma função logística. .

O primeiro passo para ajustar as curvas de utilidade do atributo tecnológico foi definir qual o ponto aonde a utilidade é igual a 1, e aonde é igual a 0. Para a fator tecnológico lâmina d'água, 6500 metros é valor onde a utilidade é igual a 1, e 200 metros igual a zero. Já para o fator profundidade do reservatório, 6500 metros tem utilidade 1, e 500 metros

utilidade zero. Com a definição do par de utilidades 0 e 1, o próximo passo é ajustar os dois modelos utilizando a Equação 4.2 como modelo para a obtenção dos valores intermediários. Para o fator lâmina d'água temos a seguinte equação:

$$u(x) = 1 - \frac{1}{1 + 0.01306e^{-0,005(x)}} \quad (4.3)$$

onde x é a lâmina d'água em metros. Para o fator profundidade do reservatório temos:

$$u(y) = \frac{1}{1 + 600e^{-0,002y}} \quad (4.4)$$

onde y é a profundidade do reservatório em metros.

Assim tem-se um par de utilidades cuja soma é a utilidade do atributo tecnológico, ou seja, $U(X,Y) = U(X) + U(Y)$, onde $U(X,Y)$ é a utilidade do ganho tecnológico, X é a medida da lâmina d'água e Y a medida da profundidade do reservatório.

No estudo de NEPOMUCENO et al. (2000) só foram usados os atributos financeiro e tecnológico, calculadas as utilidades e aplicadas no modelo de decisão de utilidade aditivo com múltiplos atributos. Para a aplicação da análise de sensibilidade bidimensional e de dimensão elevada foi acrescentado aos objetivos da empresa um terceiro atributo: *risco de mercado*. Segundo FURTADO & SUSLICK (2000), o atributo risco de mercado pode ser definido como sendo a facilidade que a empresa tem em transformar o óleo bruto em produtos derivados do petróleo, ou seja, a facilidade de acesso à estrutura de transformação da matéria prima proveniente da produção de petróleo. No nosso caso, o prospecto B é o que está mais próximo da estrutura de transformação, sendo atribuído utilidade de 0,95, ao prospecto C foi atribuído uma utilidade de 0,20, por possuir a menor facilidade em relação a estrutura de transformação. O prospecto A tem uma estrutura intermediária, ou seja, inferior à do prospecto B e superior à do prospecto C, assim foi atribuído 0,85 como valor de utilidade.

Com a definição das utilidade dos atributos, o passo seguinte é aplicar estas utilidades no modelo de decisão múltiplos atributos. Na Tabela 4.3 tem-se os pesos definidos para cada atributo e na Tabela 4.4 tem-se os valores de utilidade de cada atributo, onde na última coluna é calculada a utilidade final de cada prospecto através do modelo aditivo.

Tabela 4.3 – Pesos dos atributos para o modelo de exploração de petróleo

Atributos	Pesos
VPL	0,70
Lâmina d'água	0,05
Profundeza do reservatório	0,05
Mercado	0,20

Tabela 4.4 – Utilidades de cada atributo e utilidade final

Prospecto	Utilidade dos Atributos				Total ^(*)
	VPL	L. D'água	P. Reservatório	Mercado	
A	0,9133	0,8405	0,9005	0,8500	0,8964
B	0,9945	0,9750	0,1684	0,9500	0,9433
C	0,9817	0,6597	0,6464	0,2000	0,7925

(*) $Total_A = 0,9133 \times 0,70 + 0,8405 \times 0,05 + 0,9005 \times 0,05 + 0,8500 \times 0,20 = 0,8964$

Com a aplicação da utilidade de cada atributo no modelo aditivo de decisão temos que o prospecto B é o que mais interage com os objetivos da empresa, sendo então o preferido. A vantagem do prospecto B sobre os demais é muito pequena, não atingindo 7%, dessa forma uma análise de sensibilidade auxiliará a avaliação do modelo. A proposta é aplicar primeiramente uma análise de sensibilidade bidimensional para avaliar o comportamento do modelo aditivo com todas as combinações possíveis de pesos. A segunda etapa é fazer a análise de sensibilidade de dimensão elevada utilizando o método

dos pesos ordenados para os modelos aditivo e multiplicativo, avaliar o cenário geral da decisão e verificar se corresponde com as preferências da empresa.

A análise de sensibilidade bidimensional é eficiente no caso de três atributos, mas somente para o modelo aditivo. A Figura 4.2 representa a análise de sensibilidade bidimensional do modelo de decisão para a escolha do melhor prospecto de exploração de petróleo.

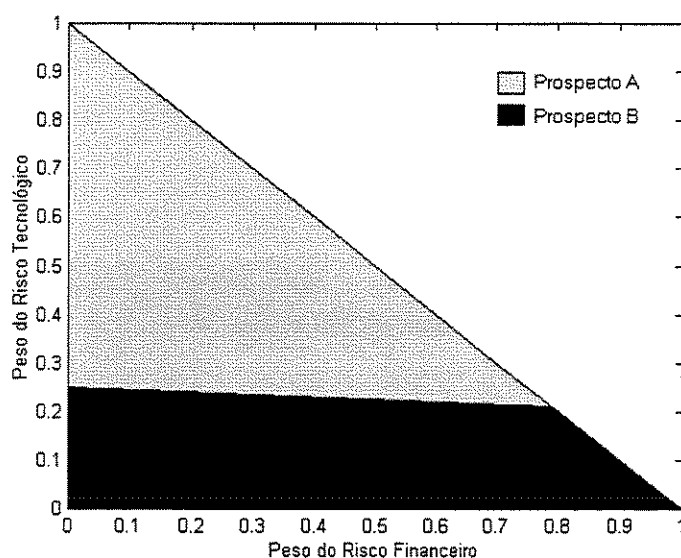


Figura 4.2 – Alternativas de prospecto de exploração de maior preferência entre todas as combinações de pesos

Conforme a combinação dos pesos, somente as alternativas A e B tem a possibilidade de serem preferidas pelo decisor (Figura 4.2). Suponha que a combinação de pesos seja 0,70, 0,10 e 0,20 para os atributos financeiro, tecnológico e mercado respectivamente (configuração proposta na Tabela 4.3), o prospecto B é a melhor alternativa para a empresa. A análise de sensibilidade bidimensional é obtida através da simulação de todas as configurações dos pesos, não levando em conta a hierarquização dos atributos. Apesar de existir uma predominância do prospecto A sobre o B (área de A maior que a área de B na Figura 4.2), quando os atributos são ordenados, a área do prospecto B se torna maior que a de A e o prospecto C não é o preferido em nenhuma combinação de pesos. Este fato será

melhor observado na análise de sensibilidade de dimensão elevada, a próxima etapa deste trabalho.

Conforme visto na Seção 3.2, a análise de sensibilidade bidimensional não verifica a interação dos pesos do modelo aditivo para n maior que 3 e para n maior que 2 no modelo multiplicativo, onde n é o número de atributos. Para avaliar e testar a robustez do modelo de decisão, é aplicada no estudo da escolha do melhor prospecto de exploração de petróleo a análise de sensibilidade de dimensão elevada.

A análise de sensibilidade de dimensão elevada é baseada em um processo estocástico, exigindo a aplicação de um software com capacidade de cálculo matricial. Neste estudo foi utilizado o software MATLAB 5.2 (1999) e adotou-se como referência o nível de 10.000 simulações para a construção do modelo aditivo e multiplicativo. O método utilizado foi o dos pesos ordenados (Seção 3.3.2), pois, conforme visto na Tabela 4.3, o decisor tem uma clara preferência em relação aos atributos.

Após a simulação dos pesos e a obtenção das utilidades de cada uma das opções para as 10.000 simulações, é calculada a frequência relativa da classificação das opções conforme o valor da utilidade (Tabela 4.5 e Tabela 4.6).

Tabela 4.5 – Frequência relativa da classificação das opções pelo modelo aditivo (exploração)

Classificação	Frequência Relativa (Modelo Aditivo)		
	Bacia		
	A	B	C
1	9,97%	90,03%	0,00%
2	86,24%	9,97%	3,79%
3	3,79%	0,00%	96,21%

O prospecto B teve a maior utilidade em 90,03% das simulações e 9,97% das simulações a sua utilidade foi menor que a do prospecto B. Em nenhuma simulação o prospecto C foi selecionado como melhor, mas 3,78% das vezes este prospecto teve a segunda melhor utilidade. O prospecto A é o único que, nas simulações, foi classificado nas três posições possíveis, mas houve uma predominância da segunda classificação com

86,24% das simulações.

Com a Tabela 4.5 fica muito difícil visualizar a dominância de uma alternativa sobre outra. Para verificar o comportamento das alternativas, traçamos o perfil hierárquico de cada uma, que é a frequência acumulada de cada opção em relação a sua classificação (Figura 4.3).

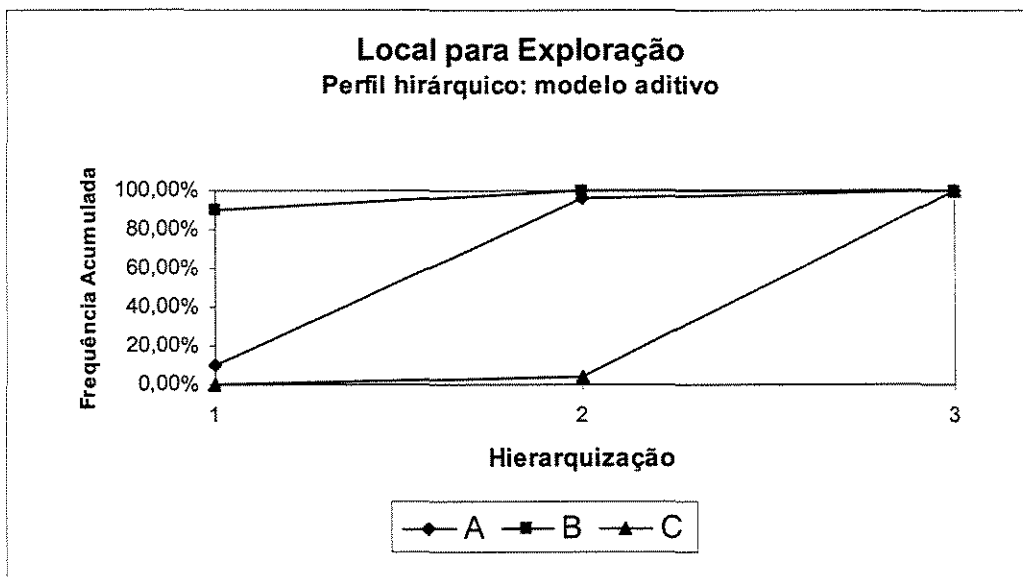


Figura 4.3 – Perfil Hierárquico: forma aditiva (exploração)

O prospecto B domina estocasticamente as demais alternativas (Figura 4.3) e a alternativa C é dominada pelas demais. Através do Figura 4.3 é possível verificar e avaliar o comportamento do modelo, tendo uma visão mais ampla do ambiente em que será tomada a decisão.

Quando aplicamos a análise de sensibilidade de dimensão elevada no modelo multiplicativo, a dominância do prospecto B sobre o A diminui, ou seja, a frequência de B ser o melhor prospecto cai para 69,37% (Tabela 4.6). Já a frequência do prospecto C na segunda posição também diminui para 1%, sendo ainda mais dominado pelas outras alternativas.

Tabela 4.6 – Frequência relativa da classificação das opções pelo modelo multiplicativo (exploração)

Classificação	Frequência Relativa (Modelo Multiplicativo)		
	Bacia		
	A	B	C
1	30,63%	69,37%	0,00%
2	68,37%	30,63%	1,00%
3	1,00%	0,00%	99,00%

Seguindo as mesmas etapas do modelo aditivo, a Figura 4.4 apresenta o gráfico de frequência acumulada de cada uma das opções em relação a classificação obtida.

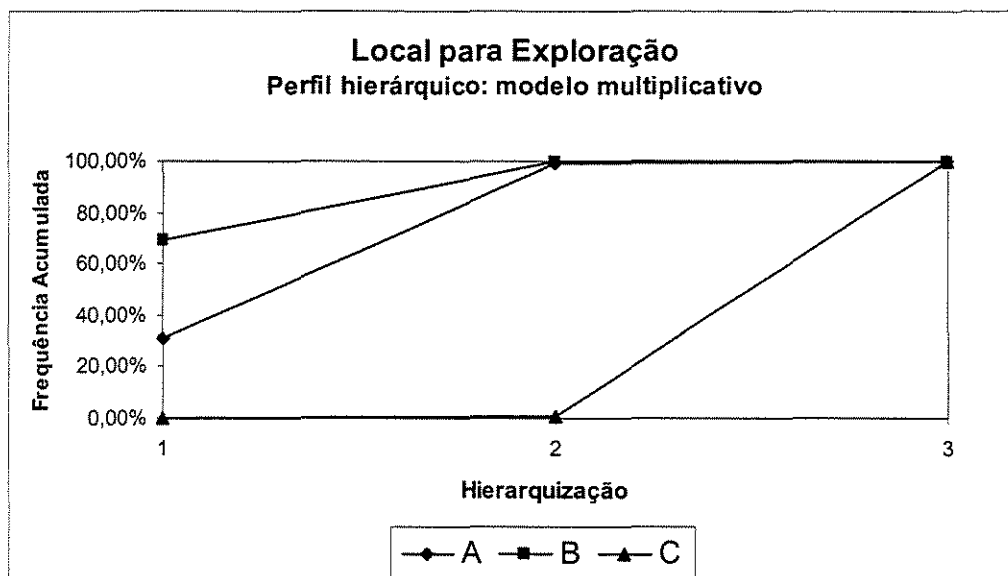


Figura 4.4 – Perfil Hierárquico: forma multiplicativa (exploração)

Novamente o prospecto B domina estocasticamente as demais alternativas, apesar deste domínio ser menos acentuado. O prospecto B é o que mais interage com os objetivos da empresa, mas é importante ressaltar que o prospecto A pode ser uma boa alternativa, caso ocorra alguma mudança cultural na empresa, ou até mesmo se o prospecto B apresentar algum aspecto não previsto anteriormente.

A vantagem desta análise é proporcionar ao tomador de decisão um cenário onde a decisão está sendo tomada, além de permitir avaliar a coerência do modelo com as

preferências do decisor. Caso o modelo de decisão não se ajuste as necessidades da empresa, deve-se reformular até que o decisor sinta-se confortável com a alternativa proposta.

4.2 – ESTUDO DE CASO 2 – ESCOLHA DO MELHOR SISTEMA DE PRODUÇÃO DE PETRÓLEO OFFSHORE

Como segundo exemplo prático nesta dissertação, vamos considerar uma companhia de petróleo que tenha os seguintes objetivos estratégicos: maior lucratividade, preservação do meio ambiente, segurança e liderança tecnológica.

Para testar a metodologia proposta foi escolhido um cenário de produção proposto por CASTRO & FURTADO (1998) e reformulado por CASTRO *et al.* (2000). A situação hipotética é um exemplo de decisão pela qual muitas corporações devem estar passando nestes últimos anos, após a descoberta de um novo campo de petróleo em uma bacia já madura, em lâmina d'água de cerca de 800 metros e com potencial de produção de 100.000 barris/dia, considerando-se o risco financeiro, tecnológico e ambiental, é necessário definir o melhor sistema de produção dentre as seguintes alternativas:

- 1^ª) Uma plataforma Semi Submersível (SS), escoando a produção de óleo via um navio “*Floating, Storage and Offloading*” (FSO) com *Turret*.
- 2^ª) Uma plataforma SS, escoando a produção de óleo via oleoduto.
- 3^ª) Um “*Floating, Production, Storage, and Offloading*” (FPSO) com *Turret*, escoando a produção de óleo via operações de “*Offloading*”.
- 4^ª) Um FPSO com *Turret*, escoando a produção de óleo via oleoduto.
- 5^ª) Uma “*Tension Leg Platform*” (TLP), escoando a produção de óleo via um navio FSO com *Turret*.
- 6^ª) Uma TLP, escoando a produção de óleo via oleoduto.

Com o cenário traçado temos três atributos no modelo que nos fornecerá o sistema de produção mais adequado entre as seis opções apresentadas. O método de análise de

sensibilidade de dimensão elevada é baseado na simulação aleatória dos pesos e necessita de um software que tenha a capacidade de cálculo matricial. Nesse estudo foi utilizado o software MATLAB 5.0 (1996) e adotou-se como referência, o nível de 10.000 interações para a construção do modelo de múltiplos atributos aditivo e multiplicativo (FURTADO & SUSLICK, 1999).

Neste caso, as funções utilidade utilizadas para os atributos financeiro e tecnológico são as mesmas do estudo de caso 1, ou seja, para o atributo financeiro a função utilidade é exponencial e para o atributo tecnológico a função é logística.

Primeiramente é montada uma planilha onde são calculados os fluxos de caixa de cada opção. Como pressupostos para todos os casos temos o preço do barril produzido a US\$15,00, uma taxa de atratividade de 8% ao ano, um imposto sobre o lucro líquido de 60% e a produção efetiva iniciando após o final do segundo ano do projeto. Na Tabela 4.7 é apresentado o resumo financeiro de cada uma das alternativas.

Tabela 4.7 – Resumo da avaliação econômica das alternativas para a produção de petróleo

Plataforma	VPL (MMU\$)	
	FSO	Oleoduto
SS	461,32	374,50
FPSO	583,10	313,83
TLP	618,59	519,89

Conforme a Equação 4.1, a função utilidade é do tipo exponencial com a seguinte característica:

$$u(x) = 1 - e^{-\alpha x} \quad (4.5)$$

onde ,

$u(x)$ = utilidade do atributo no ponto x ,

x = valor da variável considerada (VPL),

c = índice de aversão ao risco.

Para calcular a utilidade do atributo financeiro basta substituir x pelo valor do VPL da alternativa desejada. O valor c é o índice de aversão ao risco, sendo inversamente proporcional à tolerância ao risco. Na Figura 4.5 temos a curva das utilidades com duas tolerâncias ao risco (200MMUS\$ e 500MMUS\$).

A componente tecnológica foi medida através do número de plataformas que estão produzindo, obtido através de um levantamento da evolução de plataformas que entraram em operação ano a ano. Estes dados foram baseados nos estudos de BEHERENBRUCH (1995), LOVIE (1997) e LOVIE (1998) e estão dispostos na Figura 4.6.

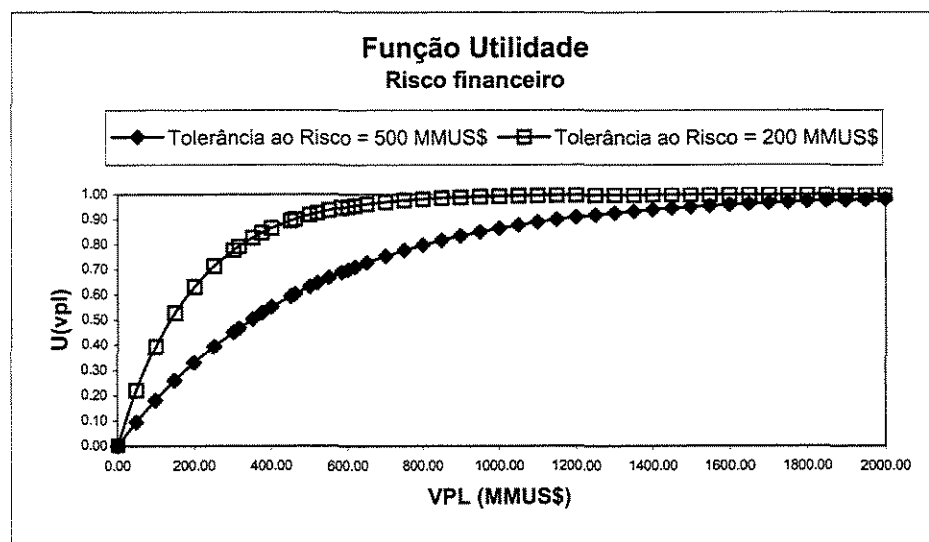


Figura 4.5 – Curva de utilidade para o atributo financeiro (produção)

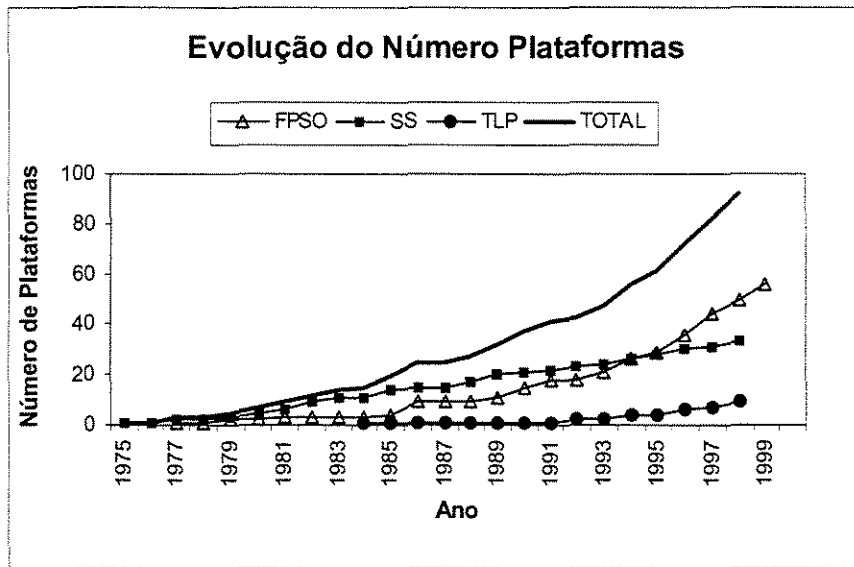


Figura 4.6 – Evolução do número acumulado de plataformas ano a ano

Conforme apresentado no estudo de caso 1, a componente tecnológica tem um comportamento logístico, ou seja, tem como função a Equação 4.2. O ajuste da quantidade total acumulada de plataformas através da equação logística é dada por:

$$u(x) = \frac{1}{0.75 + 70e^{-0.06x}} \quad (4.6)$$

onde a aversão ao risco ($c=0,06$) é obtida empiricamente.

Para soma total de plataformas foi atribuído utilidade 1 e para a nulidade de plataformas a utilidade 0. As utilidades de cada uma das alternativas foi calculada pela Equação 4.6, onde x é a quantidade de plataformas (Tabela 4.8) que estão produzindo óleo em 1999 (Figura 4.7).

Tabela 4.8 – Quantidade de plataformas instaladas e produzindo

Plataformas	Quantidade
SS	33
FPSO	50
TLP	9
<i>Total</i>	<i>92</i>

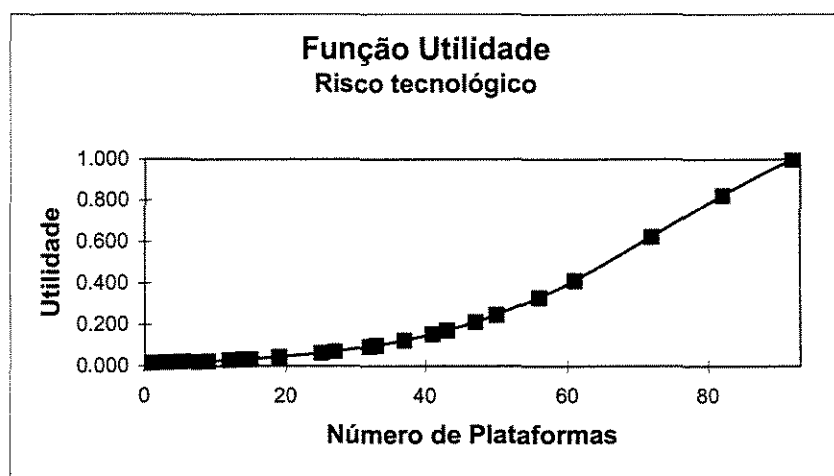


Figura 4.7 – Curva de utilidade do atributo risco tecnológico

A modelagem do risco ambiental na área de petróleo é mais complexa, pois a disponibilidade de informações para unidades de produção de petróleo flutuantes é bastante limitada. Após o levantamento das informações, somente foi possível identificar os sistemas de produção SS que apresentam um índice de vazamentos de 0,0005% vazamentos / unidade por ano (STATISTICAL REPORT, 1992).

Tendo em vista que as informações não incluem dados recentes, não foi possível diferenciar, através de dados de campo, o risco ambiental entre as seis opções de desenvolvimento propostas. Foi feita então uma pesquisa com técnicos da área de análise de risco ambiental e gerentes tomadores de decisão, onde foram detectadas as seguintes preferências e justificativas:

- A TLP por utilizar Árvores de Natal Secas e *Risers* rígidos, é o sistema que apresenta o menor risco ambiental, logo a sua utilidade é máxima neste aspecto, e considerada como 1.
- A SS apresenta dois pontos desfavoráveis com relação a TLP, o primeiro é a maior complexidade do sistema de lastro, e o segundo é que utiliza poços satélites com Árvore de Natal Molhada, *Risers* e linhas flexíveis. Como estes equipamentos ficam expostos no fundo do mar, estão sujeitos a acidentes com outros tipos de equipamentos, como âncoras de rebocadores, etc..., logo o seu potencial risco ambiental é maior e sua utilidade avaliada como 0,85.
- O FPSO é o sistema de maior risco ambiental, pois além de ter todas as desvantagens da SS, armazena petróleo nos seus tanques internos (na realidade é um navio petroleiro com uma planta de processo de petróleo), aumentando muito o seu potencial de risco, logo a sua utilidade foi avaliada em 0,6.
- Tanto a TLP quanto a SS, quando considera-se a opção de projeto escoando óleo por um FSO, incluem na sua concepção uma monoboia e a utilização de petroleiros para transporte do petróleo, isto significa a inclusão de dois pontos de risco ambiental, logo as suas utilidades devem ser multiplicadas por 0,6.
- No caso do FPSO sem oleoduto não é necessário a instalação de monoboia, logo a sua utilidade original deve ser multiplicada apenas por 0,8.

Uma vez definidas as utilidades dos atributos, o próximo passo é definir a importância relativa dos objetivos e aplicar estes pesos no modelo de decisão. A Tabela 4.9 apresenta os pesos dos atributos estipulados pelo decisor e na Tabela 4.10 temos estes pesos multiplicados pelas utilidades de cada atributo. A última coluna da Tabela 4.10 é a utilidade de cada uma das alternativas.

Tabela 4.9 - Pesos dos atributos para a escolha do sistema de produção

Atributo	Importância Relativa
Financeiro	0,75
Tecnológico	0,05
Ambiental	0,20

Tabela 4.10 – Utilidade de cada opção de plataforma de petróleo

Sistema de Produção	Financeiro	Tecnológico	Ambiental	Utilidade Total
TLP + oleoduto	0,485	0,00227	0,194	0,68149
TLP + FSO	0,532	0,00227	0,123	0,65767
FPSO	0,516	0,01296	0,095	0,62445
SS + oleoduto	0,395	0,00576	0,168	0,56963
SS + FSO	0,452	0,00576	0,101	0,55841
FPSO + oleoduto	0,350	0,01296	0,123	0,48563

A plataforma TLP escoando a produção de óleo via oleoduto é a melhor opção para a decisão com utilidade igual a 0,68149, sendo a segunda opção o sistema TLP escoando óleo via navio com utilidade igual a 0,65767 (Tabela 4.10). Outra observação importante reside no fato que as três primeiras opções tem utilidades muito próximas, o que faz-se necessário uma análise mais detalhada.

A forma mais adequada de avaliar o modelo é através da análise de sensibilidade, sendo este o objetivo principal deste trabalho. Como discutido no Capítulo 3, a análise de sensibilidade unidimensional não capta a interação entre os atributos, então o processo de avaliação do modelo de decisão será através da análise de sensibilidade bidimensional.

O modelo de decisão aditivo foi aplicado para a escolha do sistema de produção mais eficiente para produzir uma bacia. Para avaliar o comportamento dos pesos dos atributos, foi aplicada a análise de sensibilidade bidimensional (Figura 4.8).

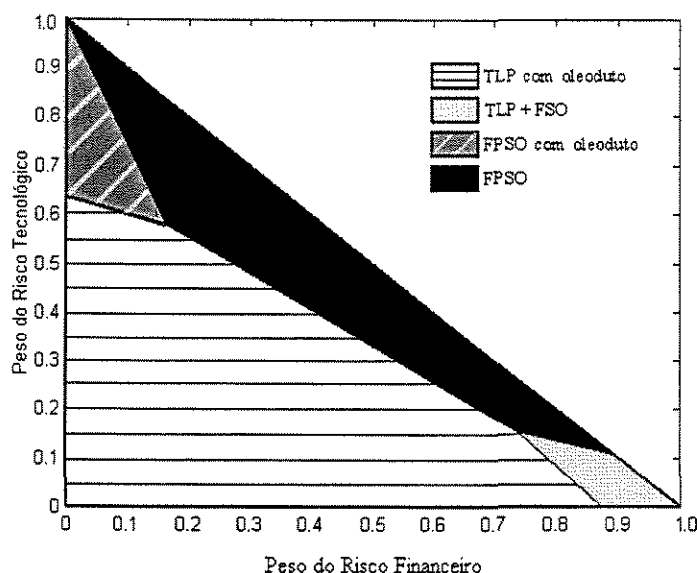


Figura 4.8 – Alternativas com maior preferência entre todas as combinações de pesos

O sistema TLP escoando óleo através de um oleoduto é a opção que ocupa a maior região do gráfico, mas algumas combinações de pesos podem fornecer ao decisor uma visão diferente do problema, ou seja, existem combinações de pesos que definem a FPSO como a melhor opção para produzir o campo. Por exemplo, suponha que o risco financeiro e tecnológico tenha um peso de 0,30 e 0,55 respectivamente. O peso do risco ambiental será 0,15, pois $k_a = 1 - k_f - k_t = 1 - 0,30 - 0,55 = 0,15$. Nestas circunstâncias, a melhor opção de plataforma para a produção da bacia é FPSO escoando óleo por um navio.

Como ressaltado no estudo de caso 1, a análise de sensibilidade bidimensional não leva em conta a ordenação dos atributos, ou seja, os pesos assumem valores de 0 a 1 não importando a ordem dos objetivos. Caso uma ordenação dos atributos seja feita, a nova figura será apenas uma parte da Figura 4.8. Esta análise de sensibilidade permite ao decisor uma visão geral do ambiente em que será tomada a decisão e por isso deve ser considerada.

Um inconveniente desta análise é o fato de aparecer alguns sistemas de produção onde nenhuma combinação de pesos satisfaça as preferências do analista. Por exemplo, no estudo de caso a SS com e sem oleoduto. Este fato não significa que estas opções devam ser descartadas. É necessário fazer uma análise mais detalhada do sistema de produção, pois ele pode aparecer como uma segunda opção e ser mais viável para a empresa.

Para avaliar as interações entre os pesos, aplicamos a análise de sensibilidade de dimensão elevada. O método utilizado foi o dos pesos ordenados (Seção 3.3.2), pois conforme visto em CASTRO & FURTADO(1998), CASTRO *et al.* (2000) e em FURTADO & SUSLICK(1999), o decisor tem preferência em relação aos atributos.

A primeira etapa é a simulação e aplicação dos pesos nos modelos de decisão, obtendo 10.000 valores de utilidade para cada alternativa. O primeiro resultado é a frequência relativa da classificação de cada opção em relação a utilidade calculada (Tabela 4.11 e Tabela 4.12).

Tabela 4.11 – Frequência relativa da classificação das opções pelo modelo aditivo (Produção)

Classificação	Frequência Relativa (Modelo Aditivo)					
	Total					
	SS + FSO	SS + oleoduto	FPSO	FPSO + oleoduto	TLP + FSO	TLP + oleoduto
1	0,00%	0,00%	0,00%	0,00%	12,10%	87,90%
2	0,00%	25,60%	9,40%	0,00%	57,90%	7,10%
3	0,00%	21,40%	48,60%	0,00%	25,00%	5,00%
4	15,90%	37,10%	42,00%	0,00%	5,00%	0,00%
5	65,90%	15,90%	0,00%	18,20%	0,00%	0,00%
6	18,20%	0,00%	0,00%	81,80%	0,00%	0,00%

O sistema de produção TLP escoando por oleoduto classificou-se como melhor opção 87,90% das simulações, mas também foi classificado como segunda e terceira opção. A TLP escoando óleo através de um petroleiro também foi classificada como a melhor opção em 12,10% das simulações, mas foi classificada como segunda opção em cerca de 58% das configurações aleatórias dos pesos. O sistema FPSO escoando óleo por oleoduto foi classificado na maior parte das simulações (81,80%) como a pior alternativa para a produção do campo em questão (Tabela 4.11). As demais alternativas se posicionam em

uma classificação intermediária.

Através da Tabela 4.11 torna-se bastante ardua a avaliação da dominância estocástica de uma alternativa sobre a outra. Na Figura 4.9 é traçado o perfil hierárquico de cada opção, ou seja, a frequência da classificação de cada opção é acumulada e postada em um gráfico.

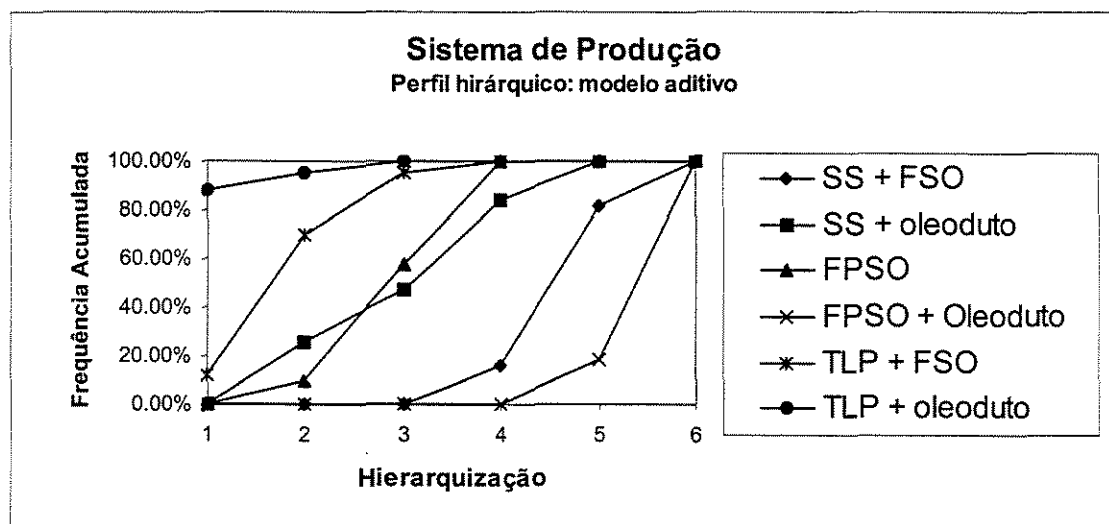


Figura 4.9 - Perfil Hierárquico: forma aditiva (produção)

A TLP escoando óleo através de oleoduto domina estocasticamente as demais opções (Figura 4.9), apesar de ser classificada algumas vezes como a segunda melhor opção (Tabela 4.11). A segunda melhor opção neste estudo é a TLP escoando óleo por um navio petroleiro, que também domina estocasticamente as demais alternativas. Conforme verificado na Tabela 4.11, a plataforma FPSO escoando por oleoduto é dominada pelas demais opções, ou seja, é a alternativa que menos interage com os principais objetivos da empresa.

As duas análises de sensibilidade (Figura 4.8, Tabela 4.11 e Figura 4.9) aplicadas no modelo de decisão não levaram em conta a interação entre os atributos, assumindo-os mutuamente independentes, o que nem sempre é verdade. Para avaliar esta interação, os pesos simulados são aplicados no modelo multiplicativo (Equação 2.5) e para então ser quantificada a frequência de cada opção em relação a classificação (Tabela 4.12).

Tabela 4.12 – Frequência relativa da classificação das opções pelo modelo multiplicativo (Produção)

Classificação	Frequência Relativa (Modelo Multiplicativo)					
	Total					
	SS + FSO	SS + oleoduto	FPSO	FPSO + oleoduto	TLP + FSO	TLP + oleoduto
1	0,00%	0,00%	1,80%	0,00%	1,10%	97,10%
2	0,00%	76,80%	4,70%	1,20%	15,90%	1,40%
3	0,00%	9,80%	22,40%	0,00%	67,10%	0,70%
4	1,20%	12,20%	71,10%	4,80%	9,90%	0,80%
5	28,00%	1,20%	0,00%	65,50%	5,30%	0,00%
6	70,80%	0,00%	0,00%	28,50%	0,70%	0,00%

A dominância da plataforma TLP com oleoduto aumentou (em 97,10% das simulações foi classificado como o sistema que mais interage com os objetivos da empresa), mas neste caso a FPSO e a TLP escoando óleo por oleoduto também se apresentam como melhores opções em 1,80% e 1,10% das simulações. Dois fatos importantes devem ser ressaltados. Primeiro, a SS escoando óleo por navio domina as outras opções como a pior alternativa (no modelo aditivo esta dominância era feita FPSO com oleoduto) e segundo, a SS com oleoduto domina as demais como uma segunda melhor opção, ou seja, quando os atributos não são considerados mutuamente independentes ocorre uma mudança no cenário da decisão.

Uma forma de visualizar o cenário obtido com o modelo multiplicativo é através do gráfico de hierarquização das opções (Figura 4.10). Como na Figura 4.8, a TLP com oleoduto domina estocasticamente as demais alternativas. As principais mudanças decorrem de que a pior opção passa a ser a SS escoando óleo por navio e de que a SS escoando óleo por oleoduto se apresenta como a segunda melhor opção. Esta variação de cenário provém da consideração da mútua independência entre os atributos (pressuposição do modelo aditivo) e é de fundamental importância, pois em casos onde as utilidades das alternativas tem valores com pequenas variações, o decisor tem condições de avaliar de forma mais clara o modelo, e até se necessário, fazer alterações no modelo.

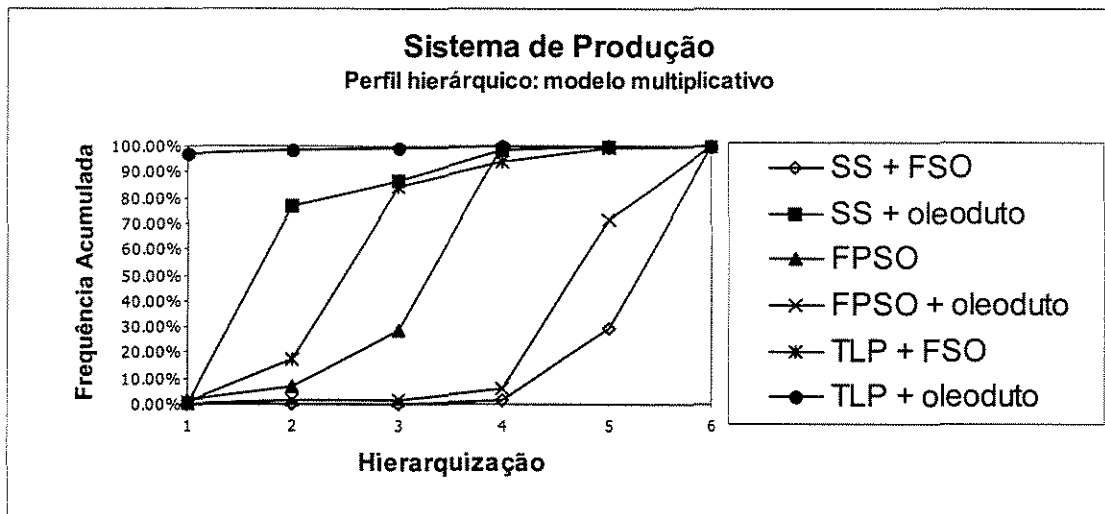


Figura 4.10- Perfil Hierárquico: forma multiplicativa (produção)

Resumidamente, conforme visto anteriormente na Figura 4.9, observa-se uma predominância do sistema TLP com oleoduto. Por sua vez, o modelo aditivo da Figura 4.9 reproduz com maior intensidade as preferências pelo TLP com oleoduto, onde em 88% das simulações este sistema de produção foi classificado como o mais eficiente. No modelo multiplicativo (Figura 4.10), a preponderância do TLP com oleoduto é ainda maior, atingindo 98% das preferências como primeira opção.

No modelo multiplicativo, quando existe a interação dos atributos financeiro, tecnológico e ambiental, o sistema de produção SS com oleoduto ocupa a segunda opção. Já no modelo aditivo, sem interação entre os atributos, o sistema SS com oleoduto situa-se abaixo das preferências dos sistemas de produção TLP com oleoduto, TLP + FSO e FPSO.

Quando o analista define a ordem de prioridade de seus atributos, por exemplo, prioridade para o atributo financeiro, seguido do ambiental e tecnológico, os sistemas FPSO com e sem oleoduto, situam-se em uma escala abaixo de preferência entre as opções. Por outro lado, quando os atributos não são hierarquizados, estes dois sistemas são classificados na primeira ordem das preferências, conforme a combinação dos pesos, principalmente quando o atributo tecnologia possui uma maior magnitude. Deste modo, fica patente o grau de importância da componente ambiental nesses sistemas de produção.

CONSIDERAÇÕES FINAIS

No atual cenário econômico, as empresas de petróleo buscam a máxima formalização das etapas do processo decisório em decorrência dos elevados riscos e do montante de capital envolvido. Deste modo, torna-se importante a criação de ferramentas para auxiliar os analistas em ambientes onde predominam múltiplos atributos que afetam a decisão e a escolha das alternativas que mais interagem com os objetivos da empresa.

A maior parte das decisões financeiras, técnicas, pessoais, etc, são tomadas em ambientes de risco e envolvem mais de um objetivo, geralmente conflitantes, existindo um *tradeoff* entre eles. O MAUT é a metodologia que incorpora a preferência do tomador de decisão em relação ao risco, além de quantificar o difícil problema da interação entre os atributos através do modelo aditivo ou multiplicativo.

Uma das primeiras tarefas do MAUT é atribuir pesos para os objetivos da empresa e como estes devem ser agregados no modelo. Como os pesos (importância relativa) do modelo com múltiplos objetivos mede a importância de pior para melhor entre os atributos, a quantificação destes tem que ser cuidadosa e deve representar de forma fiel as preferências da empresa e do tomador de decisão em relação aos seus principais objetivos. A principal preocupação deste trabalho foi a de apresentar uma forma de avaliar os pesos e a robustez do modelo de decisão com múltiplos critérios para projetos de exploração e produção de petróleo *offshore*.

Uma vez estimado os pesos, torna-se importante realizar uma análise de sensibilidade para verificar o comportamento dos mesmos. De um modo geral, as técnicas tipicamente usadas variam somente um único peso de maneira isolada, conservando os demais constantes e observando a sensibilidade no modelo. A existência de um método que proporcione observar a variação de todos os pesos de uma só vez torna-se um instrumento bastante útil para a análise de sensibilidade.

A principal proposta desta dissertação foi interpretar e aplicar a análise de sensibilidade de dimensão elevada na estimação dos pesos do modelo de decisão com múltiplos atributos em projetos de exploração e produção de petróleo. O objetivo principal

foi fornecer uma ferramenta sistemática que avalie os pesos, bem como teste a consistência do modelo de decisão.

Dentre as três possibilidades de análise de sensibilidade de dimensão elevada, optamos pela técnica que ordena os pesos conforme a importância para o decisor de cada atributo. A razão por usar esta técnica foi devido a facilidade de classificar os objetivos por ordem de importância, pois enquanto a atribuição de um valor exato para os pesos pode ser questionada, uma ordem de importância relativa dos atributos pode ser bem menos controversa. Uma outra razão decorre do fato que é uma técnica simples de ser aplicada, pois basta gerar aleatoriamente os pesos e classificá-los de acordo com as preferências do decisor. Não podemos deixar de mencionar que nos dois estudos apresentados, o decisor estava apto a classificar com exatidão a ordem de importância de cada objetivo.

Devemos ressaltar que a técnica de geração totalmente aleatória dos pesos é muito importante de modo que o decisor possa avaliar o comportamento do problema em que está envolvido. Nos dois estudos de casos aqui apresentados, os problemas possuem apenas três atributos, o que facilita a classificação destes por ordem de importância, mas podem existir casos onde o número de atributos seja maior que três e com importâncias semelhantes, tendo o decisor dificuldade em classificar os objetivos claramente. Neste sentido, a análise de sensibilidade de dimensão elevada com pesos simulados totalmente aleatórios torna-se muito útil, oferecendo ao decisor uma visão geral do cenário onde será tomada a decisão.

Uma terceira opção de análise de sensibilidade de dimensão elevada sugerida é a simulação dos pesos conforme uma distribuição estatística. Para um simples tomador de decisão, esta variação pode ser em função dos erros associados com a estimação dos pesos. Em relação a um grupo de pessoas, diferentes opiniões e preferências dos decisores são responsáveis por esta variação. Suponha que o decisor ou um grupo de decisores possam classificar com exatidão a ordem de importância de cada objetivo, o grande problema associado com este terceiro método concentra-se no fato que, se os pesos possuírem valores relativamente próximos ou os atributos forem muitos, pode-se ocorrer uma inversão na ordem de importância dos objetivos, o que irá de encontro com a preferência da empresa, fazendo com que não tenhamos um cenário de decisão consistente. Mas a simulação dos pesos através de uma distribuição estatística é uma técnica que pode ser bastante explorada

quando o decisor só consegue atribuir o valor dos pesos para seus objetivos dentro de intervalos.

Os resultados obtidos com a análise de sensibilidade de dimensão elevada foram bastante auspiciosos, superando as restrições naturais da análise bidimensional que não incorpora a dinâmica da interação dos atributos no processo decisório. No primeiro estudo de caso, o decisor teve a exata visão que o prospecto B de exploração de petróleo é o mais eficiente, pois esta opção domina estocasticamente as demais alternativas tanto no caso aditivo (onde os atributos são mutuamente independentes), quanto no caso multiplicativo. A simulação do modelo de dimensão elevada para o segundo estudo de caso mostra claramente a vantagem do sistema de produção TLP com oleoduto (forma aditiva e multiplicativa), pois este sistema situa-se como primeira opção na ordem das preferências do analista e manteve uma certa consistência nas simulações.

A consideração mais importante deste trabalho é salientar que a técnica de análise de sensibilidade proposta não procura somente sugerir uma opção que melhor se ajuste às preferências da empresa, e sim traçar um cenário onde o decisor possa analisar o comportamento de todas as alternativas simultaneamente. Esta é uma técnica que visa reduzir o risco da decisão, mas não eliminá-lo totalmente, fornecendo um meio de avaliar o modelo proposto, onde é possível optar pela tomada da decisão ou então por um refinamento do modelo. Resumidamente, a análise de sensibilidade de dimensão elevada é uma ferramenta que deve ser incorporada ao processo decisório como um meio de avaliar e analisar o modelo e não como uma técnica que vai fornecer ao tomador de decisão uma alternativa definitiva.

A análise de sensibilidade de dimensão elevada também permite um tratamento estatístico mais detalhado, gerando os perfis hierárquicos que se ajustam de maneira mais adequada às preferências das empresas, além de proporcionar condições mais favoráveis e reais na tomada de decisão.

REFERENCIAS BIBLIOGRÁFICAS

BEKMAN, O.R., COSTA NETO, P.L.O. Análise estatística da decisão. 2.ed. São Paulo: Edgard Blücher, 1993. 124p.

BAIRD, B.F. Managerial decisions under uncertainty: an introduction to the analysis of decision making. New York: John Wiley & Sons, 1989. 527p.

BEHRENBURCH, P. Floating production facilities key to lower deepwater development. Offshore, Oct. 1995, p.41-45

BUTLER, J., JIA, J., DYER, J. Simulation techniques for sensitive analysis of multi-criteria decision models, European Journal of Operational Research, vol. 103, nº3, Dec. 1997, p.531-545.

BELTON, V. A comparison of the analytic hierarchy process and a simple multi-attribute value function. European Journal of Operational Research. Number 26, 1986, p.7-21.

CASEY, J.A. Environmental protection in mine development: an application of multiobjective decision analysis. 3º Annual Meeting – MEMS, Washington, DC. March 24-26, 1994, p.91-111.

CASTRO, G.T., FURTADO, R. Um processo de decisão que leva em conta os riscos tecnológicos, ambientais e financeiros. Campinas: UNICAMP/IG/DARM, 1998. 30p. (Trabalho apresentado no curso de Avaliação Econômica de Projetos de Mineração e de Petróleo, Departamento de Recursos Minerais).

CASTRO, G.T., MOROOKA, C.K., SUSLICK, S.B., FURTADO, R. Um processo decisório que leva em conta os riscos tecnológicos, ambientais e financeiros. Congreso Produccion 2000. Argentina, Maio, 2000. (no prelo).

- CLEMEN, R.T. Making hard decision: an introduction to decisions analysis. Belmont: Duxbury Press, 1990. 557p.
- COZZOLINO, J.M. A simplified utility framework for the analysis of financial risk. Economics and Evaluation Symposium of the Society of Petroleum Engineers. SPE 6359, Dallas, Texas, 1977, p.282-290
- COZZOLINO, J.M. Controlling risk in capital budgeting: a practical use of utility theory for measurement and control of petroleum exploration risk. The Engineering Economist, v.25, nº 3, 1980, p.161-186.
- DIAZ GALEANO, Y. Metodologia para o desenvolvimento de campos de petróleo. Campinas, 1998. 91p. (Dissertação de Mestrado em Engenharia do Petróleo (Faculdade de Engenharia Mecânica, Departamento de Engenharia do Petróleo), Universidade Estadual de Campinas).
- EHRLICH, P.J. Modelos quantitativos de apoio às decisões – I. Revista de Administração de Empresas. São Paulo: EAESP/FGV, v.36, n.1, p.33-41, jan./fev./mar.1996.
- _____. Modelos quantitativos de apoio às decisões – II. Revista de Administração de Empresas. São Paulo: EAESP/FGV, v.36, n.2, p.44-52, abr./maio/jun.1996.
- FURTADO, R., SUSLICK, S.B. Análise de sensibilidade em modelos de decisão multiatributos em sistemas de produção de petróleo. XV Congresso de Engenharia Mecânica (COBEM). Águas de Lindóia, SP. Nov. 1999. 10p.
- FURTADO, R., SUSLICK, S.B. A tool for scaling weights for multi-attribute decision models for oil exploration and production systems. Congreso Produccion 2000. Argentina, Maio, 2000 (no prelo).
- GENTRY, D., O'NEIL, T. Mine investment analysis. New York: AIME, 1984. 505p.

GRANT, E.L., IRESON, W.G., LEAVENWORTH, R.S. Principles of engineering economy. 8^a ed. New York: John Wiley & Sons, 1990. 591p.

GROEBNER, D.F., SHANNON, P.W. Business statistics: a decision making approach. 4^a ed. New York: Macmillan, 1993.

HOWARD, R. Decision analysis: practice and promise. Management Science, v. 34, n.6, 1988, p. 679-695.

KEENEY, R.L. Decision analysis: an overview. Operations Research. n^o 30; 1982, p.803-808.

KEENEY, R. L. Siting energy facilities. New York: Wiley, 1980.

KEENEY, R.L., RAIFFA, H. Decisions with multiple objectives: preferences and value tradeoffs. New York: John Wiley & Sons, 1976. 501p.

KIRKWOOD, C.W. Strategic decision making: multiobjective decision analysis with spreadsheets. Local: Duxbury Press, 1996. 345p.

KIRKWOOD, C.W., SARIN, R.K. Ranking with partial information: a method and application. Operations Research, vol. 33, n^o 1. Jan.-Feb. 1985, p.38-48.

LANFORD, H.W. Technological forecasting methodologies. Analytical Techniques: Advanced trend Analysis. American Management Association, 1972, p.59-91.

LOVIE, P.M. Today's world of FPSOs changes quickly. Word Oil. Apr. 1997, p.79-84 and 91.

_____. Developing smaller offshore fields with FPSOs. Word Oil, Jul. 1998, p. 61-68.

- MANNARINO, R. Introdução à engenharia econômica. Rio de Janeiro: Editora Campus, 1991. 198p.
- NEPOMUCENO, F. Tomada de decisão em projetos de riscos na exploração de petróleo. Tese de Doutorado. Campinas, 1997. 243p. (Tese de Doutorado em Administração e Política de Recursos Minerais (Instituto de Geociências, Departamento de Administração e Política de Recursos Minerais), Universidade Estadual de Campinas).
- NEPOMUCENO, F., SUSLICK, S.B. Uso da teoria da preferência em projetos de exploração de petróleo. XXXIX Congresso Brasileiro de Geologia, vol 7, Salvador, set/1996, p.136-140.
- _____. Alocação de recursos financeiros em projetos de risco na exploração de petróleo, Revista de Administração de Empresas. Fundação Getúlio Vargas (FGV), São Paulo, SP, v. 40, n. 1, 2000, p. 63-75.
- NEPOMUCENO, F., SUSLICK, S.B., WALLS, M.R, Investment and technology decision model in offshore oil exploration in Brazil: a decision analysis using multi-attribute utility theory. Natural Resources Research, Journ.Int.Mathematical Geology, 2000 (no prelo).
- NEWENDORP, P.D. Decision analysis for petroleum exploration. Tulsa: PennwellBooks, 1975. 668p.
- OLIGNEY, R.E., ECONOMIDES, M.J. Technology as an asset. Hart's Petroleum Engineer International. Sep. 1998, p. 27-38.
- OLSON, D.L. Use of centroid approach for selection sensitivity analysis. Working paper, Texas A&M University, College Station Texas. 1996.

- PRATT, J.W. Risk aversion in the small and large. Econometrica, vol. 32, 1964, p.22-136.
- RAY, T., MALLICK, S.K. A decision model for option FPSO acquisition and management. Offshore Technology Conference. OTC 8392. Houston, Texas, 5-8 May 1997. 9p.
- SCHOEMAKER, P.J.H., WAID, C.C. An experimental comparison of different approaches to determining weights in additive utility models. Management Science, vol. 28, nº 2, Feb. 1982, p.182-196.
- SOLYMOSI, T., DOMBI, J. A method for determining the weights of criteria: the centralized weights. European Journal of Operational Research, nº 26, 1986. p.35-41.
- SOUZA, P.A. Avaliação econômica de projetos de mineração: análise de sensibilidade e análise de risco. Belo Horizonte: IETC, 1995. 230p.
- STERMOLE, F.J., STERMOLE, J.M. Economic evaluation and investment decision methods. 8ª ed. Golden, Colorado: Investments Evaluations Corporation, 1993. 646p.
- VON NEUMANN, J., MORGENSTERN, O. Theory of games and economic behavior. 3ª ed. Princeton: Princeton University Press, 1953.
- WALLS, M.R. Corporate risk tolerance and capital allocation: a practical approach to setting and implementing an exploration risk policy. In: Managing Risk and Strategic Decisions in Petroleum Exploration Seminar. Rio de Janeiro: PETROBRÁS. 1994. 17p.
- _____. Integrating business strategy and capital allocation: an application of multi-objective decision making. The Engineering Economist, vol. 40, nº 3, 1995, p.247-266.

WALLS, M.R., DYER, J.S., Risk propensity and firm performance: a study of the petroleum exploration industry. Management Science, vol. 42, n^o 7, Jul. 1996, p.1004-1021.

WHITNEY, J.W., WHITNEY, R.E. Investment and risk analysis in mineral industry. Nevada: John Whitney, 1978. 224p.

World Offshore Accident Data bank (WOAD), Statistical Report 1992, Technica.